



**UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR**  
**Ciências**

# **Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público**

**Paulo Jorge Ribeiro Soares**

Orientador: Professora Doutora Sandra da Costa Henriques Soares

Co-Orientador: Professor Doutor Pedro Gabriel de Faria Lapa Barbosa de Almeida

Covilhã, Outubro de 2011

Trabalho apresentado no âmbito da unidade curricular de ESTÁGIO NAS ÁREAS DE FÍSICA E QUÍMICA, do Mestrado em Ensino de Física e Química no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário.

O conteúdo do presente trabalho é da exclusiva responsabilidade do autor,  
Paulo Jorge Ribeiro Soares.

---

# Agradecimentos

A concretização deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas. Gostaria disso, de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade.

À minha orientadora Professora Doutora Sandra Soares, pela confiança sempre demonstrada, encorajamento e ajuda ao longo deste trabalho.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor Pedro Almeida pelo apoio e pelas sugestões de grande valor e conhecimento que me transmitiu.

À Directora da Escola Secundária da Sé (Guarda), Dra. Cristina Fernandes Vicente, pela disponibilidade, simpatia e apoio demonstrado.

Ao Instituto Tecnológico e Nuclear pelo inestimável apoio logístico e técnico fornecido.

Ao Centro de Óptica de Universidade da Beira Interior pela disponibilidade demonstrada.

E por ultimo um agradecimento muito especial à minha esposa e à minha filha por todo o apoio, carinho e amor demonstrado.

A todos o meu muito obrigado.

# Resumo

O radão é um gás nobre, radioactivo, que tem origem na cadeia de decaimento do urânio. Como não reage quimicamente, ao ser libertado espontaneamente dos maciços rochosos, onde é produzido, ou ao dissolver-se na água contida nos poros de materiais geológicos, mistura-se facilmente com o ar.

Em termos geológicos a Guarda pode ser caracterizada pela abundância de diversos tipos de granitos. Em alguns locais, a predominância de determinados minerais uraníferos e a existências de falhas podem ser responsáveis pela presença de uma certa quantidade de radiação natural, semelhante à que é detectável em outras zonas do país.

A realização de medidas de actividade alfa e gama, no interior de edifícios, é de vital importância, visto que um elevado teor de radão afecta a qualidade do ar do seu interior, podendo da sua inalação resultar um significativo incremento no aparecimento de cancro do pulmão. A Organização Mundial da Saúde classifica, desde 1988, o radão como cancerígeno e recomenda que a concentração de radão habitacional não ultrapasse os  $100\text{Bq}/\text{m}^3$ .

As escolas estão abrangidas pelo disposto no Decreto-Lei 79/2006, que regulamenta a qualidade do ar interior. No que diz respeito ao radão, este decreto estabelece a obrigatoriedade de pesquisa nos distritos endémicos (Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco), fixando o limite máximo a observar para a sua concentração nos edifícios construídos em  $400\text{Bq}/\text{m}^3$  (a recomendação 90/143/EURATOM fixa a concentração deste gás no interior dos edifícios em  $200\text{Bq}/\text{m}^3$  para as novas construções e em  $400\text{Bq}/\text{m}^3$  para as já existentes).

O objectivo deste trabalho consiste em identificar zonas de incidência de concentrações de radão, superiores ao limite máximo estipulado por lei, no interior da Escola Secundária da Sé (Guarda) e identificar áreas prioritárias em termos de aplicação de um eventual Plano de Mitigação.

De forma a obter um perfil de densidades, horizontal e vertical, de concentração de radão foram colocados, uniformemente, por toda a área escolar, 120 detectores passivos do tipo LR-115 II (108 detectores LR-115 II da Kodak-Pathé manufacturados e 12 detectores LR-115 II fornecidos pelo Instituto Tecnológico e Nuclear). Para correlacionar a concentração de radão com a emissão de radiação gama, esta medição foi feita em todas as divisões onde foram colocados os detectores passivos.

No cálculo da concentração de radão utilizou-se um método, simples e inovador, de contagem da densidade de traços recorrendo ao programa LEOWorks (disponível gratuitamente, na internet, pela Agência Espacial Europeia). Este método revelou-se uma importante ferramenta para se obter a concentração de radão de uma forma mais rápida, simples e económica.

# Abstract

Radon is a noble radioactive gas originating in the decay chain of uranium. Since it does not react chemically, it easily mixes with the air as it is released spontaneously from the rock massifs where it is produced, or when it dissolves in the water stored in the pores of geological material.

Geologically Guarda can be characterised by the great quantity of several types of granite. In some places, the predominance of certain uranium minerals and the existence of faults may be responsible for the existence of a certain amount of natural radiation, similar to the amount found in other areas of the country.

It is vital to measure the alpha and gamma activity indoors, since a high level of radon affects the quality of the air inside buildings, and its inhalation may result in a significant increase of the risk of lung cancer. In 1988 the World Health Organisation classified radon as a carcinogen and they recommend that radon concentration indoors should not exceed  $100\text{Bq/m}^3$ .

Schools are submitted to Decree 79/2006, which rules the quality of the air indoors. In what concerns radon, this decree mandates research in the endemic districts (Braga, Vila Real, Porto, Guarda Viseu and Castelo Branco). It also establishes that  $400\text{Bq/m}^3$  is the maximum limit to the concentration of radon in buildings (recommendation 90/143/EURATOM establishes the limit to the concentration of this gas in  $200\text{Bq/m}^3$  inside new buildings and in  $400\text{Bq/m}^3$  inside the old ones).

The purpose of this research is to identify areas of incidence of radon concentration above the legal maximum limit inside Sé Secondary School, in Guarda, and to identify priority areas for the use of an eventual Mitigation Plan.

120 passive detectors, type LR-115 II (108 manufactured Kodak-Pathé LR-115 II detectors and 12 LR-115 II detectors supplied by the Technological and Nuclear Institute) were evenly placed all over the school area in order to obtain a horizontal and vertical density profile of the concentration of radon. This measurement was undertaken in all the rooms where the passive detectors had been placed, so that we could correlate the concentration of radon with the emission of gamma radiation.

To calculate the concentration of radon we used a simple and innovative method to count the density of traits, with the help of the programme LEOworks (European Space Agency). This method has become an important tool to obtain the concentration of radon in a quicker, simpler and more economic way.

# Lista de Abreviaturas

**EURATOM** - European Atomic Energy Community

**OMS** - Organização Mundial da Saúde

**UNSCEAR** - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

**ITN** - Instituto Tecnológico e Nuclear

**AND** - Ácido desoxirribonucleico

**SSNTD's** - Solid State Nuclear Track Detectors

**AEE** - Agência Espacial Europeia

**UBI** - Universidade da Beira Interior

# Índice

Introdução	1
<b>Capítulo 1: Radiação</b>	<b>2</b>
1.1. Radioactividade.....	2
1.2. Radiação Natural.....	5
1.2.1. Radioactividade natural de origem terrestre. O radão nas séries de decaimento.....	5
1.2.2. Radioactividade natural de origem cósmica.....	7
1.2.3. Decaimento Radioactivo.....	9
1.2.4. Dose de exposição a fontes de radiação natural.....	12
1.3. Legislação.....	13
1.4. Efeitos na saúde devido à exposição ao radão e seus descendentes.....	14
1.5. Concentração de radão em ambiente fechado.....	15
<b>Capítulo 2: Técnicas e Métodos</b>	<b>17</b>
2.1. Técnicas de medição do radão e dos seus produtos de decaimento.....	17
2.1.1. Técnicas de detecção activa e de detecção passiva .....	18
2.2. Métodos de medida de radiação gama.....	19
2.3. Sistemas de detecção de radiação natural utilizados.....	19
2.3.1. Detector LR - 155 II.....	19
2.3.2. Detectores por ionização em gases.....	21
2.3.3. Detectores cintiladores.....	22
<b>Capítulo 3: Recolha de Dados</b>	<b>25</b>
3.1. Preparação e colocação dos detectores passivos.....	25
3.2. Aferição do método de contagem.....	26

<b>Capítulo 4: Resultados e Discussão</b>	33
4.1. Caracterização da escola e dos espaços analisados.....	33
4.2. Distribuição da concentração de radão.....	35
4.2.1. Distribuição horizontal.....	35
4.2.2. Distribuição vertical.....	43
4.3. Distribuição de radiação gama.....	44
4.3.1. Distribuição horizontal.....	45
4.3.2. Distribuição vertical.....	53
4.4. Modo de colocação dos detectores.....	54
<b>Conclusões</b>	55
<b>Bibliografia</b>	57
<b>Anexo I</b>	59

# Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Experiência de Rutherford	2
<b>Figura 2:</b> Exemplo de um decaimento alfa	3
<b>Figura 3:</b> Exemplo de um decaimento Beta	4
<b>Figura 4:</b> Exemplo de um decaimento gama	4
<b>Figura 5:</b> Série radioactiva natural do urânio	6
<b>Figura 6:</b> Série radioactiva natural do tório	6
<b>Figura 7:</b> Carta geológica simplificada de Portugal Continental	7
<b>Figura 8:</b> Interação da radiação cósmica com gases atmosféricos e formação de novos elementos	8
<b>Figura 9:</b> Lei do decaimento radioactivo exponencial	9
<b>Figura 10:</b> Concentrações médias anuais de radão por concelho	13
<b>Figura 11:</b> Efeitos das radiações ionizantes sobre o ADN	14
<b>Figura 12:</b> Gráfico da variação da concentração de radão	15
<b>Figura 13:</b> Vias de penetração de radão em edifícios	16
<b>Figura 14:</b> Detector passivo	17
<b>Figura 15:</b> Fita de detector LR 115 II	20
<b>Figura 16:</b> Lavagem das películas LR - 115 II	21
<b>Figura 17:</b> Secagem das películas LR - 115 II	21
<b>Figura 18:</b> Detector portátil Geiger-Muller modelo FH40F	22
<b>Figura 19:</b> Cintilometro modelo 5I5X12 da <i>Alpha Spectra, inc.</i>	23
<b>Figura 20:</b> Detector portátil PM1703M	24
<b>Figura 21:</b> Detector ITN	25
<b>Figura 22:</b> Detectores LR-115 II da Kodak-Pathe (manufacturados)	25
<b>Figura 23:</b> Aspecto da fita do detector artesanal número 96	27
<b>Figura 24:</b> Definição da região de análise do filme (Crop)	28
<b>Figura 25:</b> Aplicação de um filtro verde	28
<b>Figura 26:</b> Microscópio óptico (gentilmente cedido pelo Centro de Óptica da UBI)	29

<b>Figura 27:</b> (A) Escala micrométrica; (B) Densidade de traços observados no detector artesanal número 3.	30
<b>Figura 28:</b> Traço resultante de um decaimento alfa ampliado 700x (Figura A), 4000x (Figura B) e 5000x (Figura C e D) com um microscópio electrónico de varrimento (gentilmente cedido pelo Centro de Óptica da UBI).	31
<b>Figura 29:</b> Programa LEOWorks (Histograma)	31
<b>Figura 30:</b> Densidade ( $\text{tr}/\text{cm}^2$ ) em função da densidade digital ( $\text{pixel}/\text{cm}^2$ )	32
<b>Figura 31:</b> Planta de Localização da Escola	33
<b>Figura 32:</b> Planta de Enquadramento	34
<b>Figura 33:</b> Distribuição de concentração de radão no RC	35
<b>Figura 34:</b> Distribuição de concentração de radão no 1º Piso	36
<b>Figura 35:</b> Distribuição de concentração de radão no 2º Piso	37
<b>Figura 36:</b> Distribuição de concentração de radão no 3º Piso	38
<b>Figura 37:</b> Distribuição de concentração de radão no 4º Piso	39
<b>Figura 38:</b> Distribuição de concentração de radão no 5º Piso	40
<b>Figura 39:</b> Distribuição de concentração de radão no pavilhão gimnodesportivo	41
<b>Figura 40:</b> Distribuição média de concentração de radão por Piso	41
<b>Figura 41:</b> Distribuição média de concentração de radão pelos 6 pisos que constituem o Bloco de Aulas	42
<b>Figura 42:</b> Distribuição média de concentração de radão no Bloco Administrativo e no pavilhão	42
<b>Figura 43:</b> Mapa de densidades de concentração do edifício principal (Bloco de Aulas e Bloco Administrativo) usando a altura como referência	43
<b>Figura 44:</b> Carta de radiação gama da do Conselho da Guarda	44
<b>Figura 45:</b> Distribuição de radiação gama no RC	45
<b>Figura 46:</b> Distribuição da radiação gama no 1º Piso	46
<b>Figura 47:</b> Distribuição radiação gama no 2º Piso	47
<b>Figura 48:</b> Distribuição de radiação gama no 3º Piso	48
<b>Figura 49:</b> Distribuição de radiação gama no 4º Piso	49
<b>Figura 50:</b> Distribuição de radiação gama no 5º Piso	50

<b>Figura 51:</b> Distribuição de radiação gama no pavilhão gimnodesportivo	51
<b>Figura 52:</b> Distribuição média de radiação gama	51
<b>Figura 53:</b> Distribuição média de radiação gama pelos 6 pisos que constituem o Bloco de Aulas	52
<b>Figura 54:</b> Distribuição média de radiação gama no Bloco Administrativo e no Pavilhão Gimnodesportivo	53
<b>Figura 55:</b> Mapa de densidades de radiação gama do edifício principal (Bloco de Aulas e Bloco Administrativo).	53

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Equivalência de unidades	11
<b>Tabela 2:</b> Exposição média mundial a fontes de radiação natural	12
<b>Tabela 3:</b> Concentração de radão (ITN)	26
<b>Tabela 4:</b> Densidade de traços ( $\text{tr}/\text{cm}^2$ )	27
<b>Tabela 5:</b> Densidade digital de traços ( $\text{pixel}/\text{cm}^2$ )	32
<b>Tabela 6:</b> Concentração de radão para o R/C	35
<b>Tabela 7:</b> Concentração de radão para o 1º Piso	36
<b>Tabela 8:</b> Concentração de radão para o 2º Piso	37
<b>Tabela 9:</b> Concentração de radão para o 3º Piso	38
<b>Tabela 10:</b> Concentração de radão para o 4º Piso	39
<b>Tabela 11:</b> Concentração de radão para o 5º Piso	40
<b>Tabela 12:</b> Concentração de radão para o Pavilhão Gimnodesportivo	40
<b>Tabela 13:</b> Radiação gama para o RC	45
<b>Tabela 14:</b> Radiação gama para o 1º Piso	46
<b>Tabela 15:</b> Radiação gama para o 2º Piso	47
<b>Tabela 16:</b> Radiação gama para o 3º Piso	48
<b>Tabela 17:</b> Radiação gama para o 4º Piso	49
<b>Tabela 18:</b> Radiação gama para o 5º Piso	50
<b>Tabela 19:</b> Radiação gama para o Pavilhão Gimnodesportivo	51
<b>Tabela 20:</b> Valores de concentração de radão: detectores CP, CB e F	54
<b>Tabela 21:</b> Valores de radiação gama obtidos com o detector Geiger FH40F (FH), o detector de Cintilação 515 X12/1.12 (C), o detector PM1703M (PM) e o levantamento efectuado da ventilação, materiais de construção e revestimento usados nas paredes e no chão da divisão.	60

# Introdução

Este trabalho tem como objectivo obter e interpretar a taxa de radiação gama ambiental e da concentração de gás radão na Escola Secundária da Sé, organismo de ensino público, na cidade da Guarda.

A realização de medidas de actividade, alfa e gama, no interior de edifícios, é de vital importância, visto que um elevado teor de radão afecta a qualidade do ar interior dos edifícios e vários autores referem-no [1] como sendo o principal causador de numerosas neoplasias pulmonares que provocam cerca de 10% dos casos de morte por cancro do pulmão.

Como o radão é um poluente com elevada perigosidade a recomendação 90/143/EURATOM, fixa a sua concentração no interior dos edifícios em  $200\text{Bq/m}^3$  para as novas construções e em  $400\text{Bq/m}^3$  para as já existentes, contudo a OMS recomenda que a concentração de radão habitacional não ultrapasse os  $100\text{Bq/m}^3$ .

Se existir risco, é necessário desenvolver metodologias, que permitam manter no interior dos edifícios, os níveis de radão dentro de valores considerados seguros, para que os seus ocupantes não sejam sujeitos a doses efectivas de exposição às radiações ionizantes, superiores aos valores de segurança. Note-se que não se trata de quantificar uma exposição elevada e pontual, mas de valores para uma exposição continuada que traduzam a dose efectiva acumulada permitida para cada indivíduo num dado período de tempo, sem riscos significativos para a saúde.

Em 1993 a Comissão das Comunidades Europeias refere que “poucos temas científicos atraem a atenção do público como a exposição humana a radiações ionizantes. Os meios de comunicação referem frequentemente esta questão, que é também objecto de perguntas frequentes nas assembleias nacionais. As atitudes para com a questão das radiações podem influenciar as grandes decisões sobre os programas energéticos e a poluição ambiental. É, pois, importante transmitir ao público a maior quantidade possível de informação sobre as radiações. Os comentadores centram a sua atenção nas fontes de radiação artificial como a reactora nuclear e os aparelhos de raios-X. Todavia, as principais fontes de radiação são naturais - raios cósmicos provenientes do espaço extra-atmosférico, raios gama provenientes das paredes e pavimentos e radão das rochas e do solo” [2].

# Capítulo 1

## Radiação

### 1.1. Radioactividade

Em 1896, Becquerel, descobriu, acidentalmente, a radioactividade natural, ao observar que os sais de urânio emitiam radiações que impressionavam uma chapa fotográfica envolvida em papel negro.

No início do século XX, Rutherford desenvolveu uma experiência para estudar este tipo de radiação. Estas radiações eram emitidas pelo material radioactivo, contido no interior de um bloco de chumbo que, quando submetidas a um campo magnético, a sua trajectória era desviada.

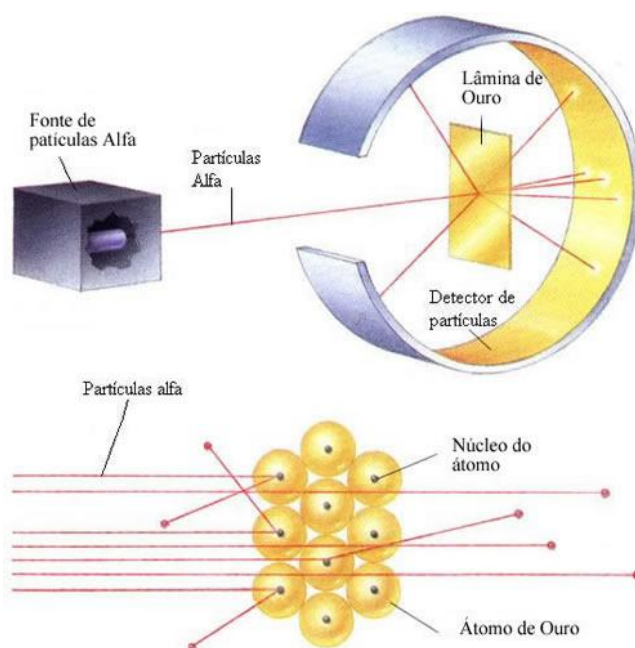


Figura 1: Experiência de Rutherford [13].

Rutherford verificou que determinadas substâncias que emitiam radiações, eram desviadas por campos eléctricos e magnéticos, e outras que não eram desviadas. Este resultado permitiu-lhe concluir que uma parte do feixe era constituída por partículas carregadas, designadas por radiação  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta), e outra parte por partículas neutras que não sofriam o efeito do campo magnético, a radiação  $\gamma$  (gama).

Quando um núcleo não é estável, transforma-se noutro mais estável por emissão de partículas ou de radiação electromagnética. Este fenómeno chama-se radioactividade.

- **Radiação  $\alpha$**

Um dos processos de estabilização de um núcleo com excesso de energia é o da emissão de um grupo de carga positiva, constituídas por dois prótons e dois neutrões, e da energia a elas associada (Figura 2).

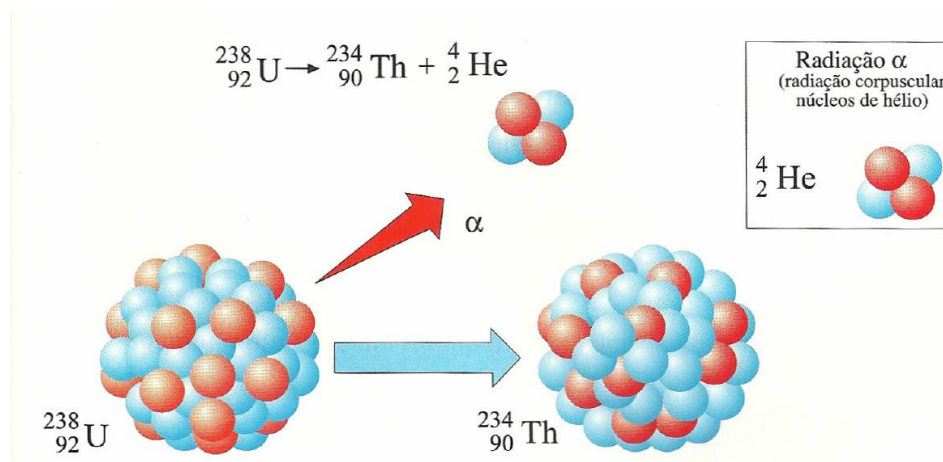


Figura 2: Exemplo de um decaimento alfa [3].

As partículas alfa (núcleos de Hélio), por serem pesadas são facilmente absorvidas, até mesmo por uma folha de papel. Não conseguem ultrapassar as camadas externas das células mortas da pele de uma pessoa, sendo então praticamente inofensivas. No entanto, podem, ocasionalmente, penetrar no organismo através de um ferimento ou pelas vias respiratórias, provocando, nesse caso, lesões graves.

- **Radiação  $\beta$**

Outra forma de estabilização, quando existe no núcleo um excesso de neutrões em relação ao número de prótons, é conseguida através da emissão de uma partícula negativa, um electrão, resultante da conversão de um neutrão num próton. Neste caso diz-se que foi libertada uma partícula  $\beta^-$ . No caso de existir um excesso de cargas positivas, prótons, é emitido um positrão, resultante da conversão de um próton num neutrão. Neste caso diz-se que foi libertada uma partícula  $\beta^+$ .

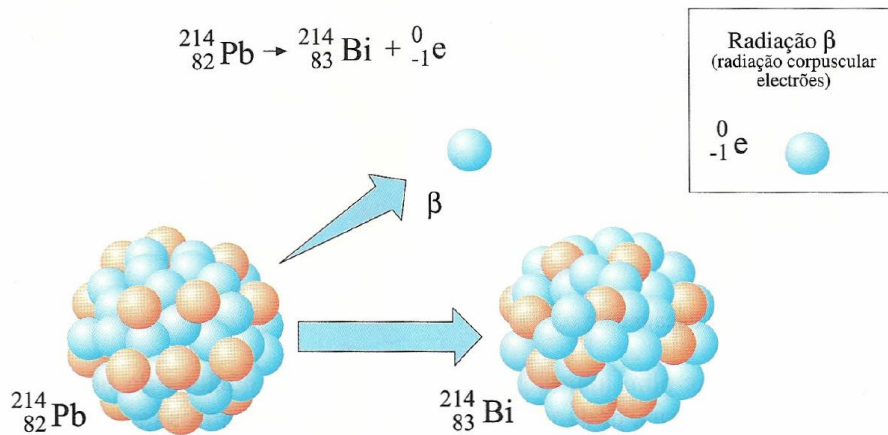


Figura 3: Exemplo de um decaimento Beta [3].

Devido à sua elevada velocidade, aproximadamente 270000km/s, as partículas beta são capazes de penetrar cerca de um centímetro nos tecidos, ocasionando danos na pele, mas não nos órgãos internos, a não ser que sejam engolidas ou entrem no tracto respiratório.

- Radiação  $\gamma$

Geralmente, após a emissão de uma partícula  $\alpha$  ou  $\beta$ , o núcleo resultante desse processo, ainda com excesso de energia, procura estabilizar-se, emitindo essa energia sob a forma de onda electromagnética, denominada radiação gama. Os raios gama são fótons de alta energia emitidos pelo núcleo de alguns átomos.

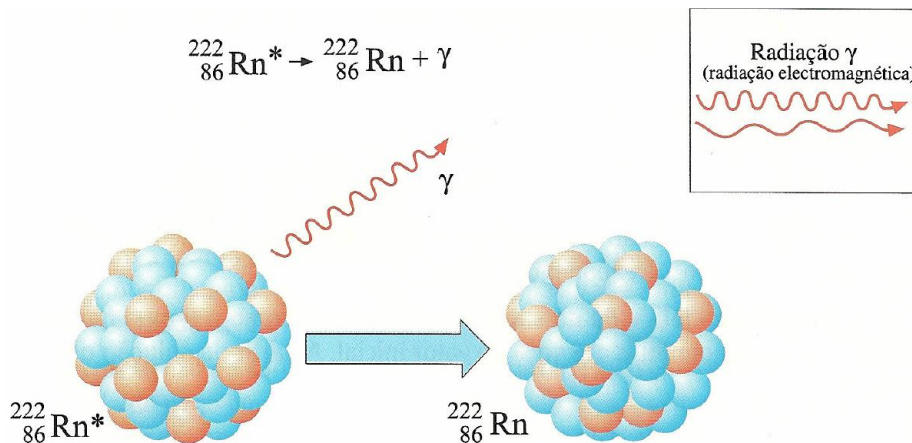


Figura 4: Exemplo de um decaimento gama [3].

Estas ondas constituem o tipo de radiação mais perigoso para os organismos vivos, podendo chegar a alterar-lhes o código genético. Assim como os raios X, os raios gama são extremamente penetrantes, pois a sua velocidade é praticamente igual à da luz no vazio, 300000km/s, sendo detidos somente por uma parede de betão ou metal.

## 1.2. Radiação Natural

Os seres humanos têm sido expostos à radiação natural ao longo de toda a sua existência e evolução. Essa exposição à radiação, emitida por fontes naturais, é inevitável e representa um factor permanente da vida quotidiana.

A radioactividade natural na atmosfera resulta fundamentalmente de dois processos: da transformação atómica que ocorre nos núcleos da matéria do Universo e que nos chega através dos raios cósmicos provenientes do espaço exterior e também do decaimento dos radionuclídeos existentes nas rochas da crosta terrestre como o urânio ( $^{238}\text{U}$ ), o tório ( $^{234}\text{Th}$ ) e o potássio ( $^{40}\text{K}$ ), que se vão transformando e dão origem a isótopos radioactivos com a emissão de partículas  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta) e  $\gamma$  (gama) e que no conjunto representa cerca de 85% [1] da dose média anual de radiação a que todos estamos expostos.

A exposição a estas radiações varia muito de local para local, dependendo principalmente da natureza do solo, da altitude e da latitude. Também para um mesmo local se verificam variações ao longo do tempo, em geral com um carácter sazonal ligado ao clima e devido, por exemplo, à interferência de fenómenos meteorológicos e hidrológicos na remoção, transporte e deposição de poeiras.

### 1.2.1. Radioactividade natural de origem terrestre: O radão nas séries de decaimento radioactivo

Como já foi referido as rochas e os solos contêm minerais naturalmente radioactivos. Alguns dos radionuclídeos presentes nas rochas podem contribuir significativamente para a radioactividade atmosférica, devido à formação de gases que podem ser exalados pela superfície terrestre. Estes gases,  $^{222}\text{Rn}$  e o seu isótopo  $^{220}\text{Rn}$ , são descendentes radioactivos directos do  $^{226}\text{Ra}$  e do  $^{224}\text{Ra}$ , respectivamente, que pertencem às séries radioactivas do urânio (Figura 5) e do tório (Figura 6).

O  $^{222}\text{Rn}$ , gás inerte com um período de semi-desintegração de cerca de 3,8 dias, tem uma probabilidade razoavelmente elevada de se difundir através dos solos e atingir a atmosfera antes de se desintegrar nos seus descendentes sólidos (polónio, bismuto e chumbo). Pelo contrário, o  $^{220}\text{Rn}$ , por ter um período de semi-desintegração de 55 segundos, apresenta uma menor probabilidade de se difundir para a atmosfera antes de se desintegrar [14].

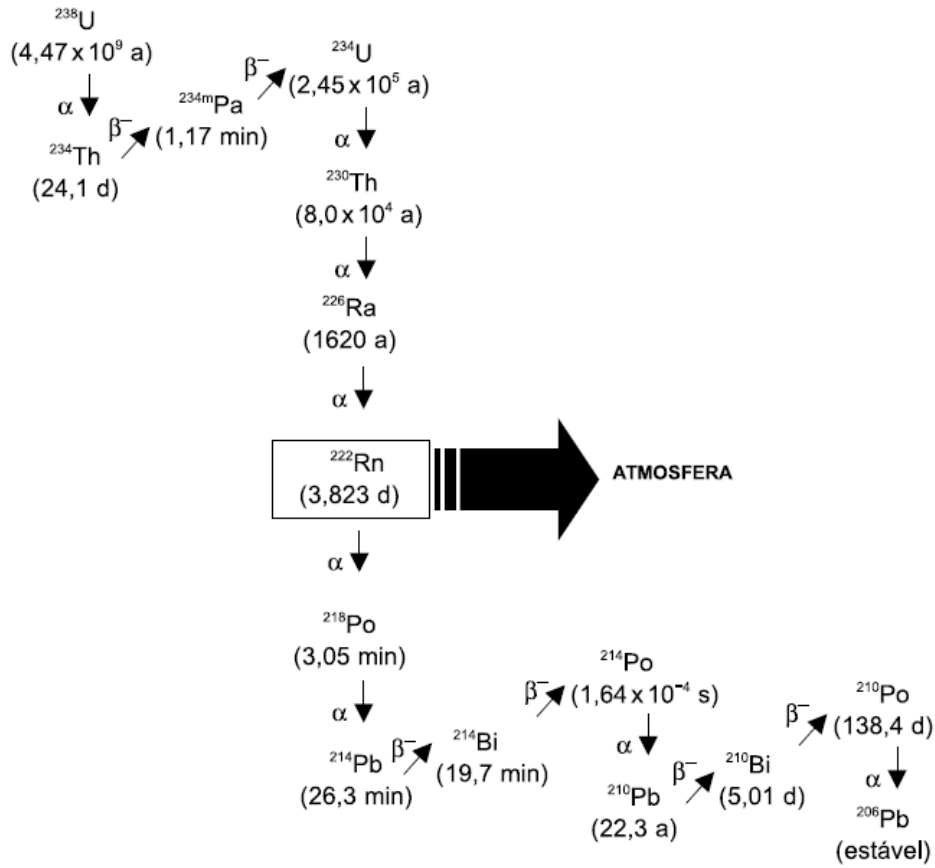


Figura 5: Série radioactiva natural do urânio [4].

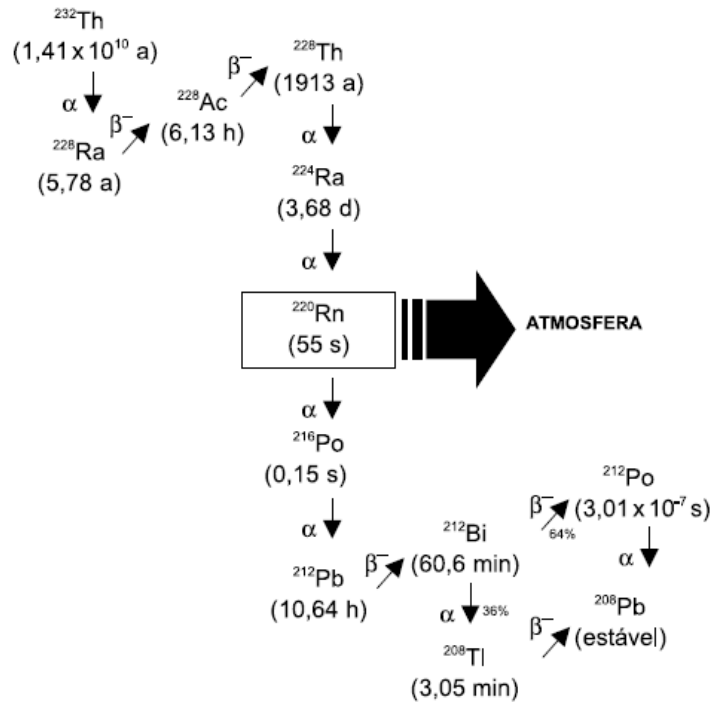


Figura 6: Série radioactiva natural do tório [4].

Nos solos e rochas, a distribuição do urânio e rádio não é uniforme. As concentrações mais elevadas ocorrem, usualmente, em rochas graníticas (plutónicas) sendo mais baixas em rochas sedimentares como os calcários.

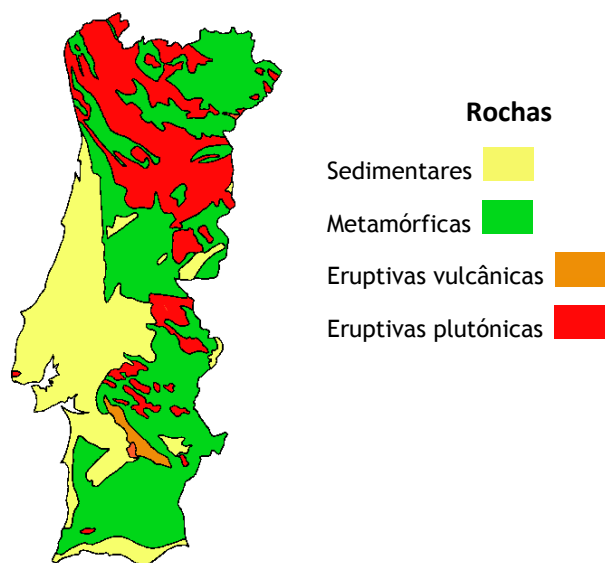
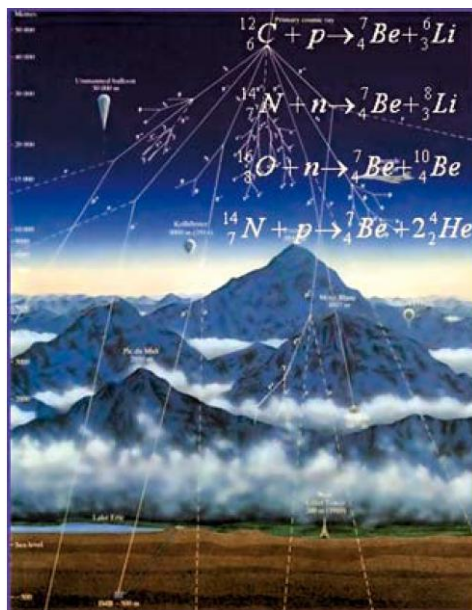


Figura 7: Carta geológica simplificada de Portugal Continental [14].

A libertação de radão para a atmosfera (exalação) está ainda condicionada pela permeabilidade e porosidade dos solos e rochas. Parâmetros meteorológicos, como a pressão atmosférica, humidade e temperatura, também influenciam a exalação do radão. Por estas razões, a sua concentração na atmosfera não é constante, variando de uma região para outra e ao longo do tempo.

### 1.2.2. Radioactividade natural de origem cósmica

Os radionuclídeos de origem cósmica são continuamente formados na atmosfera através da interacção da radiação cósmica, altamente energética, com gases atmosféricos. Os raios cósmicos, ao colidirem com os átomos da atmosfera, geram uma elevada quantidade de neutrões e protões que interagem com núcleos leves de carbono, azoto e oxigénio, os quais se desintegram formando novos elementos, incluindo isótopos radioactivos (Figura 8). São inúmeros os radionuclídeos que têm vindo a ser observados desde a década de sessenta, sendo os mais importantes, do ponto de vista de dose para a população, o  $^3\text{H}$  (trítio), o  $^7\text{Be}$  (berílio-7), o  $^{14}\text{C}$  (carbono-14) e o  $^{22}\text{Na}$  (sódio-22) [2].



**Figura 8:** Interação da radiação cósmica com gases atmosféricos e formação de novos elementos [4].

As taxas de produção destes radionuclidos cosmogénicos são razoavelmente constantes, o que frequentemente permite o seu uso como traçadores de processos geoquímicos. No entanto, é de salientar que foram produzidas quantidades consideráveis de  ${}^3\text{H}$  e de  ${}^{14}\text{C}$  nos testes de bombas nucleares, que se dispersaram no ambiente, adicionando-se aos inventários dos mesmos nuclidos produzidos por reacções cosmogénicas. Por este motivo devem ser realizadas correcções em todos os estudos de datação que recorrem a estes traçadores radioactivos naturais. De uma forma geral a dose de radiação resultante da radiação cosmogénica, é cerca de 15% da dose média efectiva devida a fontes naturais.

### 1.2.3. Decaimento radioactivo

Os núcleos atómicos têm tendência a atingir a estabilidade. Se um isótopo estiver numa configuração instável ele emitirá radiação para atingir um estado estável.

Um átomo pode libertar energia e estabilizar através de emissão de partículas pelo núcleo ou emissão de fotões de alta frequência.

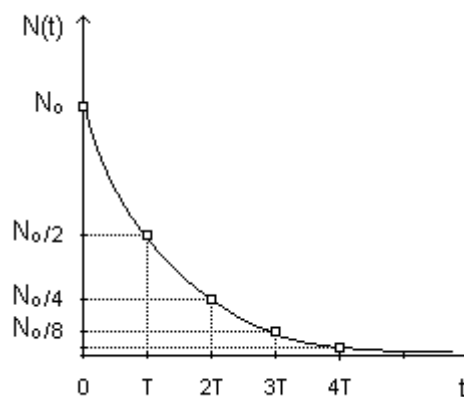
O processo pelo qual um átomo liberta, espontaneamente, energia do seu núcleo é chamado decaimento radioactivo. As emissões de radiação são feitas de modo imprevisível e não é possível saber qual o momento em que um núcleo irá emitir radiação [8].

Então, quando um núcleo não é estável, transforma-se noutra mais estável por emissão de radiação electromagnética. A ocorrência de um processo de decaimento de um núcleo é perfeitamente aleatória, isto é, trata-se de um processo estatístico, ou seja, para um átomo individualmente não é possível determinar quando ele decairá, apenas é possível determinar a probabilidade dele decair.

O número de núcleos de uma amostra radioactiva diminui exponencialmente com o tempo, sendo a função que representa a lei do decaimento radioactivo dada por,

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

onde  $N$  representa o número de núcleos radioactivos presentes na amostra,  $N_0$  o número de núcleos radioactivos iniciais e  $\lambda$  a constante de decaimento, característica de cada substância.



**Figura 9:** Lei do decaimento radioactivo exponencial.

A constante de decaimento está relacionada com o tempo de meia-vida,  $t_{1/2}$  (tempo que decorre até que o número de núcleos radioactivos se reduza a metade do valor inicial) através da relação,

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (2)$$

substituindo (2) em (1) obtém-se:

$$N = N_0 2^{-t/t_{1/2}} \quad (3)$$

Esta lei, que rege o decaimento radioactivo, mostra que o tempo necessário para um dado número de átomos radioactivos se reduzir a metade, é uma constante que não depende do número inicial de átomos. Sabemos se a vida do elemento é curta ou longa através da constante de desintegração radioactiva que, com já foi dito, é uma característica de cada elemento radioactivo [7].

- **Actividade**

A actividade de uma substância radioactiva é medida pelo número de desintegrações por unidade de tempo, isto é, traduz-se pelo número de átomos que decaem por unidade de tempo. Em cada emissão de uma partícula  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta) ou  $\gamma$  (gama), há uma variação do número de protões no núcleo, isto é, o elemento transforma-se noutra cujo comportamento químico é diferente [7].

- **Unidades utilizadas em radioactividade. Dosímetros**

A actividade de um radionuclídeo mede-se em Curie, Ci. Diz-se que uma amostra tem uma actividade de 1Ci, quando são produzidas  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo [7].

No entanto, a unidade do Sistema Internacional (SI) para a quantificação da actividade de um radionuclídeo é o Becquerel (Bq), que se define pela ocorrência de desintegrações num dado período de tempo. Assim, 1Bq representa uma desintegração por segundo. Consequentemente,  $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$ .

O Roentgen (R) representa a quantidade de energia necessária para libertar partículas carregadas de uma unidade electrostática por centímetro cúbico de ar seco em condições PTN (pressão e temperatura normais) e dá-nos uma medida da exposição à radiação. Esta unidade foi substituída pelo rad (radiation absorbed dose), que representa a quantidade de radiação absorvida [7].

O Gray (Gy) é a unidade SI adoptada para a dose de radiação absorvida, sendo definida como a absorção de 1J de energia por quilograma (kg) de matéria, veio substituir o rad.

A medida de dose equivalente é dada pelo produto da dose absorvida por um factor de qualidade relacionado com a eficácia da radiação em causar danos biológicos. A unidade SI para a dose equivalente é o Siverte (Sv).

Na tabela 1 encontram-se as equivalências de algumas destas unidades.

**Tabela 1:** Equivalência de unidades [7].

Equivalências
1Bq = 1 decaimento por segundo
1 Ci = $3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
1 R = $2.58 \times 10^{-4} \text{ C kg}^{-1} \text{ air}$
1 rad = 0.01 Gy
1 Gy = $1 \text{ J kg}^{-1} = 100 \text{ rad}$
1 Sv = 100 rem
1 eV = $1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$

- **Dosimetria**

A dosimetria é um campo da ciência que se dedica à quantificação da radiação capaz de provocar alterações químicas, físicas e biológicas num dado alvo que a radiação atinge. Através da dosimetria, é possível estabelecer uma relação entre os efeitos biológicos provocados pela radiação, e o aumento da dose de radiação recebida por um dado alvo. Esta relação é importante para se monitorizar e estudar, por exemplo, a exposição do ser humano à radiação [7].

Em dosimetria, a dose absorvida, ou simplesmente dose, está ligada à transmissão estocástica de energia, e é um conceito primário no que se refere a quantidades. É definida como a energia absorvida por unidade de massa, m, num qualquer alvo, proveniente de um tipo de radiação ionizante, em Gy (J/kg).

Pode ser aplicada tanto à radiação directa ionizante, como à indirectamente ionizante, e é definida por,

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (4)$$

onde,  $d\varepsilon$ , representa a energia média que é absorvida por um corpo de massa, m [7].

### 1.2.4. Dose de exposição a fontes de radiação natural

A exposição média mundial da população a fontes de radiação natural é estimada em 2,4mSv por ano, podendo variar entre 1 e 10mSv (por ano) [6]. Os diversos componentes da dose de exposição, com os respectivos intervalos de variação, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Exposição média mundial a fontes de radiação natural [6].

	Dose Anual Efectiva ( mSv)	
	Média	Intervalo de Variação
Radiação Cósmica		
- Fotões	0,28	-
- Neutrões	0,10	-
- Radionuclidos Cosmogénicos	0,01	-
<b>TOTAL</b>	<b>0,39</b>	<b>0,3 (a)</b>
Radiação Externa Terrestre		
- Exterior	0,07	
- Interior	0,41	
<b>TOTAL</b>	<b>0,48</b>	<b>0,3 - 0,6 (b)</b>
Inalação		
- Séries do Urânio e do Tório	0,006	
- Radão (222Rn)	1,15	
- Radão (220 Rn)	0,10	
<b>TOTAL</b>	<b>1,26</b>	<b>0,2 – 10 (c)</b>
Ingestão		
- <sup>40</sup> K	0,17	
- Séries do Urânio e do Tório	0,12	
<b>TOTAL</b>	<b>0,29</b>	<b>0,2 – 0,8 (d)</b>
<b>TOTAL</b>	<b>2,4</b>	<b>1-10</b>

(a) Variação desde o nível do mar até à maior altitude; (b) Variação em função da radioactividade dos solos e dos materiais de construção; (c) Variação em função da acumulação de radão no interior; (d) Variação em função do conteúdo em radionuclidos dos alimentos e água

Como referido, as doses de exposição para a população resultantes de actividades industriais que processam matérias-primas naturalmente radioactivas podem variar entre 1 e 10µSv por ano, de acordo com as estimativas [6].

### 1.3. Legislação

A União Europeia (Directiva 90/143/EURATOM) recomenda que para habitações já construídas as concentrações médias anuais não ultrapassem os  $400\text{Bq}/\text{m}^3$  e que para futuras construções os níveis de radão sejam mantidos abaixo dos  $200\text{Bq}/\text{m}^3$  [12].

Em Portugal, as escolas, bem como a generalidade dos edifícios de serviços, encontram-se abrangidas pelo disposto no Decreto-Lei 79/2006, que regulamenta a qualidade do ar interior. Para o radão, o decreto estabelece a obrigatoriedade de pesquisa nos distritos endémicos (Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco), fixando o limite a observar para a concentração do radão em  $400\text{Bq}/\text{m}^3$ . Esta legislação refere que nos casos particularmente graves (limite anteriormente indicado acrescido de 50%), as sanções aplicáveis incluam a suspensão de licença de utilização ou do exercício de actividades e funções, e estabelece em dois anos a periodicidade das auditorias de qualidade do ar interior.

De acordo com fontes do ITN, sabe-se que vários países adoptaram já limites legais de radão nas habitações (por exemplo: Suíça  $200\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Para alcançar estes níveis há que planear de forma mais cuidadosa a construção dos edifícios (com caixas de ar, ventilação) e dar atenção à escolha dos materiais de construção. Isto é importante, sobretudo, nas regiões de radioactividade natural mais elevada, como é o caso das regiões graníticas com especial incidência na Região da Beira Alta.

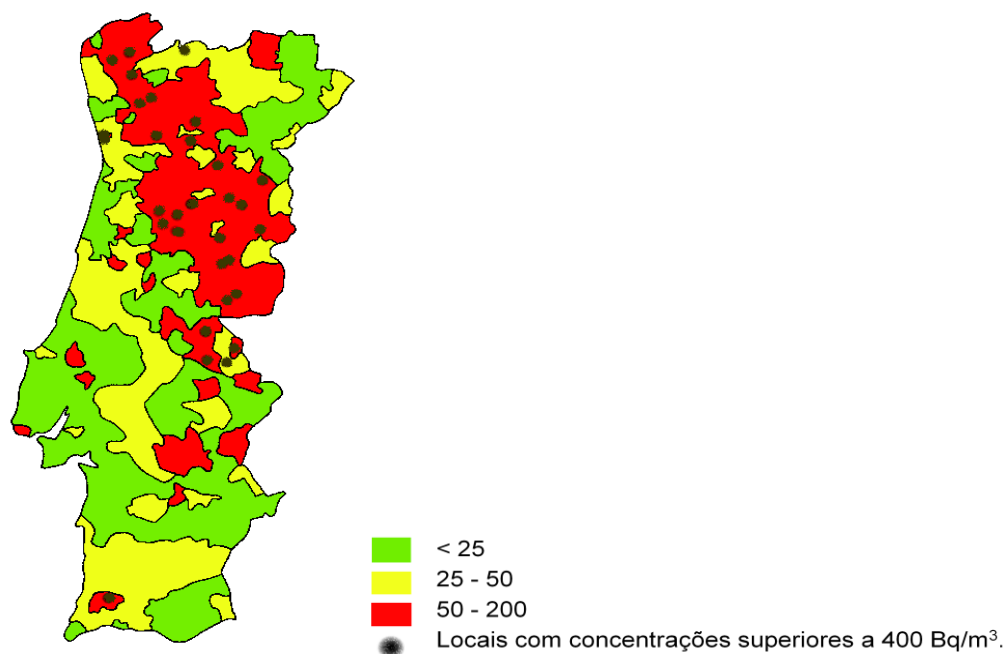


Figura 10: Concentrações médias anuais de radão por concelho [14].

O conhecimento destes factores acrescido dos efeitos na saúde devido à exposição ao radão e aos seus descendentes, reforça a pertinência do estudo realizado neste trabalho.

## 1.4. Efeitos na saúde devido à exposição ao radão e seus descendentes

A radiação ionizante é constituída pelas partículas libertadas nos processos de decaimento radioactivo que ao interagirem com a matéria podem deslocar electrões das suas orbitais atómicas, transformando átomos (electricamente neutros) em iões. A radiação alfa, beta, gama, os raios-X e alguns neutrões possuem propriedades ionizantes. A capacidade ionizante dessas partículas é proporcional à sua massa.

A exposição dos seres vivos às radiações ionizantes provoca quebras nas cadeias do ADN do núcleo celular ou ainda efeitos indirectos por formação de radicais livres  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$  por ionização da água, principal constituinte celular. Esses radicais altamente reactivos podem alterar as cadeias do ADN.

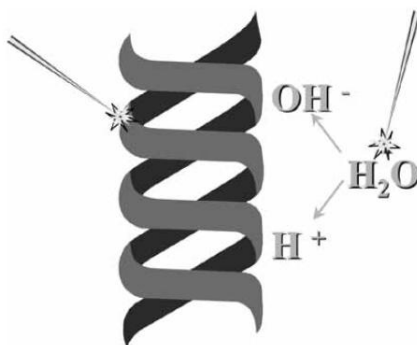


Figura 11: Efeitos das radiações ionizantes sobre o ADN.

Os danos causados a nível celular devido à exposição às radiações ionizantes podem ser observados pela perda das funções orgânicas, através de mutações e até mesmo pela morte celular. Segundo diversos autores as consequências dessa exposição são previsíveis e dependem da dose de radiação recebida podendo registar-se em situações limite, alterações sanguíneas para doses efectivas da ordem dos 0,5Sv e a morte imediata para doses superiores a 20Sv.

De facto, a exposição a níveis reduzidos de radiação ionizante não origina efeitos visíveis imediatos, mas reflecte-se em alterações ao ADN que, conseqüentemente irá manifestar-se numa data muito posterior à da exposição, sob a forma de doenças degenerativas, cancro ou à transmissão hereditária de malformações [1].

A Organização Mundial da Saúde (OMS) classifica, desde 1988, o radão como cancerígeno e recomenda que a concentração habitacional não ultrapasse os  $100\text{Bq}/\text{m}^3$ .

## 1.5. Concentração de radão em ambiente fechado

A concentração de radão em ambientes de convívio humano é diferente para cada localidade devido, principalmente, às diferenças na geologia do solo, materiais de construção, tipo de clima e costumes domésticos [1].

As zonas graníticas são os principais locais de acumulação de radão, não só pelo granito abundar no solo, mas também por ser utilizado, muito frequentemente, como material de construção. Este tende a acumular-se no interior dos edifícios, principalmente naqueles que não são correctamente ventilados. Como já foi referido, verificam-se variações sazonais na sua concentração, sendo maior no Verão do que no Inverno. No entanto, no interior as concentrações são maiores no Inverno do que no Verão, por causa das diferenças resultantes dos hábitos de ventilação. Os níveis também variam ao longo do dia, sendo mais elevados durante a noite devido às temperaturas mais reduzidas [14]. Também neste caso, no interior das habitações, acontece o contrário, uma vez que as pessoas arejam mais as suas casas durante o dia.

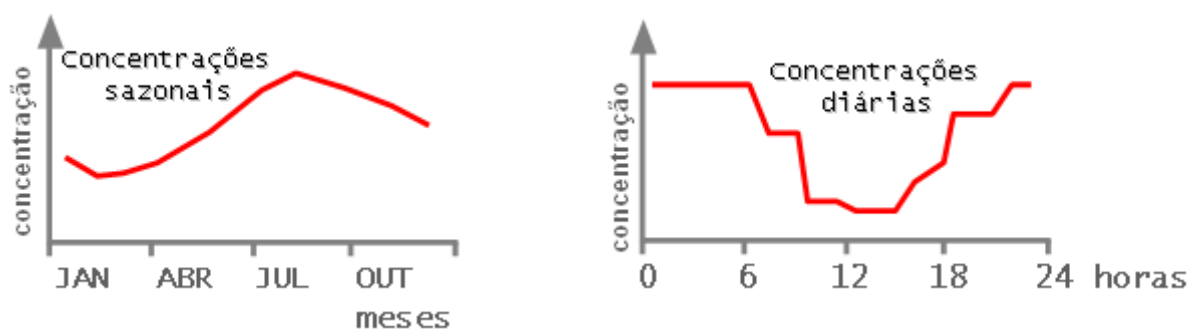
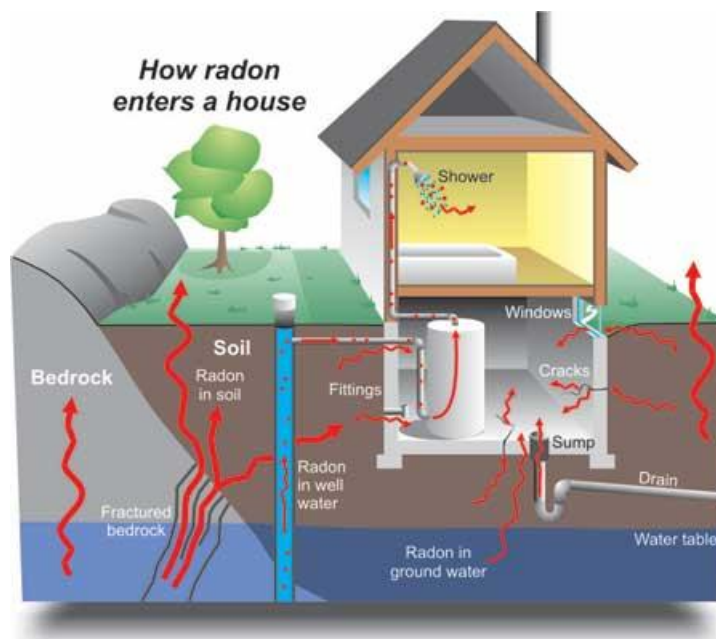


Figura 12: Gráfico da variação da concentração de radão [14].

A entrada do radão numa habitação ocorre mais frequentemente através de zonas de contacto com o solo, como fissuras no chão ou juntas de canalização mal vedadas. Por outro lado, se a água utilizada na habitação for proveniente de um furo, o radão pode entrar através do abastecimento, não apenas quando é consumida, mas também ao evaporar-se quando é aquecida. Em menor proporção, os materiais de construção podem também contribuir para o aumento dos valores de radão (Figura 13). Este gás tende a acumular-se nas zonas mais baixas (caves e pisos térreos) pois é oito vezes mais denso do que o ar.

Como as zonas de falhas ou de antigas minas de compostos radioactivos são locais muito propícios à acumulação de radão, é necessário algum cuidado na escolha dos locais para a construção de novas habitações. No entanto, no caso das habitações e edifícios já existentes, as acções de redução do radão podem incluir, por exemplo, medidas que passam por selar todas as fendas existentes no pavimento ou juntas de tubagens, de modo a impedir as entradas do radão do solo para a zona ocupacional e também promover a ventilação natural.



**Figura 13:** Vias de penetração de radão em edifícios [15].

Antes de se empreender medidas de redução do radão, é essencial conhecer as concentrações de radão existentes no interior dos edifícios, pelo que, um dos objectivos deste trabalho consiste na medição de radiação natural (alfa e gama), de forma a perceber-se se são, ou não, necessárias medidas de mitigação para melhorar a qualidade do ar no interior da Escola Secundária da Sé.

## Capítulo 2

# Técnicas e métodos

As radiações ionizantes por si só não podem ser medidas directamente. A detecção é efectuada através resultado produzido pela interacção da radiação com um meio sensível que permite determinar a quantidade de radiação presente em um determinado meio de interesse.

### 2.1. Técnicas de medição do radão e dos seus produtos de decaimento

O radão é radioactivo assim como os seus descendentes e portanto, a maior parte dos métodos de detecção deste elemento tem como principio esta característica, ou seja, a emissão de partículas alfa, beta e gama da sua série de decaimento. Levando em conta esse facto, os detectores frequentemente utilizados são os detectores de traços, chamados SSNTD's (Solid State Nuclear Track Detectors) como os detectores passivos LR-115 (nitrato de celulose) e CR-39 (di allil carbonato de dietileno glicol).



Figura 14: Detector passivo CR-39.

O detector passivo CR-39 regista a presença de partículas alfa durante o período de amostragem é um dos detectores de traços mais utilizados (a par com o detector passivo LR - 115) nos dispositivos SSNTDs (Solid State Nuclear Track Detectors - detectores do estado sólido). Este detector utiliza um filme que assinala a passagem de partículas alfa através do registo de traços, que são depois contados para estimar a concentração. Este detector deve ficar armazenado durante o período de exposição e o tempo de exposição destes detectores pode variar de poucos dias a alguns anos. Para as medições em edifícios, diversos autores demonstram que o período de exposição óptimo é de três meses [9].

Dados recentes confirmam que o detector passivo LR - 115, embora apresente um maior custo é mais sensível e eficiente para a medição de radão que o detector CR -39 [10]. Pelo que este foi o detector passivo utilizado neste trabalho e será posteriormente objecto de uma análise mais aprofundada.

### 2.1.1. Técnicas de detecção activa e de detecção passiva

Os métodos de medida do radão e seus descendentes podem ser divididos de acordo com os procedimentos de medida, em dois grupos, **detecção activa** e **detecção passiva**:

- **Detecção activa:** consiste essencialmente em medições instantâneas da concentração de radão ou descendentes do ar em intervalos de tempo curtos (da ordem dos minutos). A amostra recolhida é depois tratada num sistema de detecção de radioactividade onde se pode medir separadamente o  $^{222}\text{Rn}$  de seus descendentes mediante o uso de filtros, campos electrostáticos negativos ou simplesmente deixando a amostra de ar em repouso durante 3 horas para que a maioria dos descendentes do radão que ingressaram no volume de detecção decaia radioactivamente e se possa medir só o radão e seus descendentes produzidos após a recolha da amostra. Os dispositivos mais populares que usam esta técnica são as células de Lucas, câmaras de ionização, espectrómetros alfa, método de dois filtros e o método de contagem integrada [12].

- **Detecção passiva:** Consiste na colocação de detectores no ambiente a ser analisado, aguardando-se um certo tempo, que pode ser bastante variável, dependendo do tipo de detector, para que o  $^{222}\text{Rn}$  seja detectado através dos impactos (traços) das partículas alfa registados no detector. Neste campo, os SSNTD's são os mais utilizados. Depois de um tratamento químico ou electroquímico adequado, esses traços são suficientemente alargados e alongados, podendo ser visíveis em um microscópio óptico. O número de traços contados por unidade de área do detector tem como resultado um valor que se relaciona directamente com a exposição acumulada, e portanto com a concentração média de emissores no período de exposição [12].

## 2.2. Métodos de medida de radiação gama

A dificuldade específica associada a equipamentos de medição de radiação gama ambiental deve-se essencialmente à complexidade inerente ao campo da radiação natural que tem componentes de origem terrestre e cósmica, podendo estar presentes vários tipos de radiação. Torna-se necessário utilizar sistemas de medida específica, sempre com alta sensibilidade, boa reprodutibilidade e com independência dos factores ambientais tais como luz, temperatura e humidade.

Tendo em conta estes factores é aconselhável o uso, por exemplo, de câmaras de ionização, espectrómetros gama, detectores cintiladores.

Neste trabalho, para detecção da radiação gama utiliza-se um detector por ionização em gases (detector Geiger - Muller modelo FH40F) e dois detectores de cintilação (Cintilómetro 5I5 X12/1.12 e o detector portátil PM1703M). Estes serão posteriormente alvo de uma análise mais detalhada.

## 2.3. Sistemas de detecção de radiação natural utilizados

### 2.3.1. Detector LR - 115 II

As pesquisas relacionadas com a análise de traços em Detectores Nucleares de Estado Sólido, conhecidos como SSNTD (Solid State Nuclear Track Detectors), em minerais e detectores de partículas têm uma grande importância na actualidade, um dos SSNTD mais utilizados é o detector LR115.

Este detector foi desenvolvido pela Kodak-Pathe e é fabricado e comercializado pela Empresa DOSIRAD sediada em França. O detector é composto de uma parte sensível de cor avermelhada, nitrato de celulose ( $C_5H_8O_9N_2$ ), que é depositada sobre um suporte de poliéster de 100  $\mu\text{m}$  de espessura. O LR-115 pode ser encontrado em dois tipos, I e II: o LR-115 tipo I é produzido com uma espessura de substrato de 6,0  $\mu\text{m}$  e o LR-115 tipo II em lâminas (9 x 12  $\text{cm}^2$ ) e rolos (1,6 cm x 30 m) com 12,0  $\mu\text{m}$  de espessura de substrato.

Neste trabalho foi utilizado o detector LR-115 tipo II que possui sensibilidade para partículas alfa numa gama de energia entre 1,7 e 4,2 MeV. Para partículas nestas gamas de energia o LR-115 II apresenta um ângulo crítico de detecção, situado entre 50 e 60° (ângulo medido a partir da normal à superfície do detector até a direcção inicial da partícula incidente, e deve-se entender como o máximo valor do ângulo com o qual os danos deixados pelas partículas incidentes podem ser visíveis através do microscópio óptico após tratamento químico adequado) [12].

Como já foi referido este detector é mais sensível e eficiente para a medição de radão que o detector CR -39. Um dos principais problemas deve-se ao facto que alguns dos “traços” observadas ao microscópio não representam traços deixados por partículas alfa, sendo estes defeitos do próprio detector, sujidade ou danos produzidos na manipulação ou ataque químico.

Uma partícula pesada e carregada electricamente como um protão ou uma partícula alfa, incide sobre a superfície sensível do detector provoca um desarranjo na sua estrutura molecular numa região cilíndrica (com diâmetro da ordem de um angstroms) a partir da superfície até uma distância igual ao alcance máximo da partícula no material e constitui os denominados traços latentes que necessitam de um ataque químico apropriado para se poderem visualizar [16].

O ataque químico dos detectores LR-115 II, neste trabalho, foi feito, em todos os casos (foram analisados por este processo 97 detectores), com uma solução de NaOH 2,5 N a uma temperatura constante de 60°C com uma flutuação inferior a 0,5°C durante um período de tempo de 85 minutos (Figura 15).



**Figura 15:** Aspecto de uma fita de detector LR 115 II submerso em uma solução de hidróxido de sódio 2,5 N, após ataque químico de 85 min.

Após o ataque químico as películas, em grupos de 24, foram introduzidas num recipiente com água destilada, com o pH previamente ajustado a 3, durante 35 minutos e com agitação constante (Figura 16).

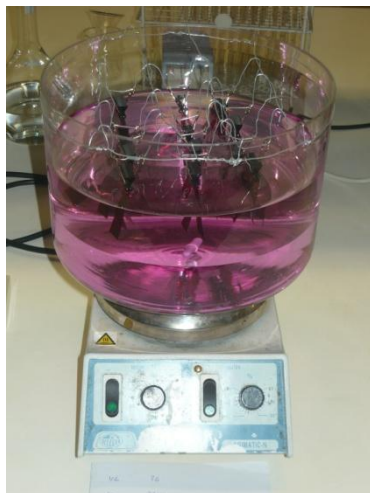


Figura 16: Lavagem das películas LR - 115 II.

As fitas foram posteriormente retiradas e submetidas a uma lavagem com água destilada com um fluxo constante durante cerca de 3 minutos e colocadas a secar numa estufa a uma temperatura entre os 18 ° C e os 28 ° C, durante 24h (Figura 17).



Figura 17: Secagem das películas LR - 115 II.

### 2.3.2. Detectores por ionização em gases

- Detector Geiger - Muller (FH40F)

Um dos primeiros tipos de detector desenvolvidos foi o chamado contador (ou tubo) de Geiger-Muller. Este contador permite detectar a presença de radiações ionizantes no entanto não permite medir a energia das partículas, apenas faz uma "contagem" do número das que, a ele chegam.

Consiste em um detector de neutrões e radiações como beta e gama, que opera numa região de campo eléctrico onde existe a multiplicação dos iões produzidos pela radiação incidente, mas não há proporcionalidade entre os pares de iões formados originalmente e a altura do pulso de saída pelo que o detector fornece sempre o mesmo sinal de saída, não

mede energias e nem consegue distinguir os tipos de partículas através da altura dos sinais produzidos.

Estes detectores possuem alta sensibilidade (como a radiação dá início ao processo de multiplicação de cargas no interior do volume de detecção este tem uma alta sensibilidade comparado com outros detectores de gás) e projecto electrónico simplificado e robusto, são portáteis e de fácil manipulação. São versáteis na detecção de diferentes tipos de radiação, mas, como referido, não permitem a discriminação do tipo de radiação e nem da energia, o que torna sua aplicação limitada.

Neste trabalho foi utilizado o detector portátil Geiger-Muller modelo FH40F2 (calibrado até Novembro de 2011) fabricado pela FAG (Figura 18).

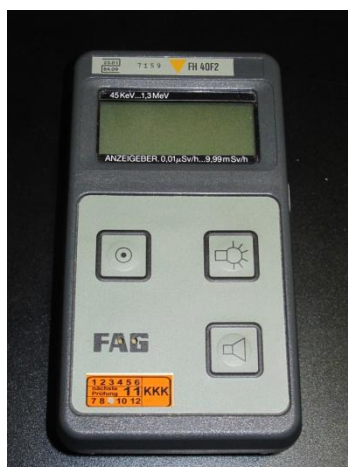


Figura 18: Detector portátil Geiger-Muller modelo FH40F

A faixa de sensibilidade em taxa de dose varia entre 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  e 9,99  $\text{mSv/h}$  e de energia entre 45 keV e 1,3 MeV.

### 2.3.3. Detectores Cintiladores

- Cintilometro

O cintilometro é um detector que possui um material cintilador (cristal de iodeto de sódio activado com tálio NaI(Tl)) cuja elevada densidade  $3,7 \times 10^3 \text{Kg m}^{-3}$  garante a sua aplicação na detecção de raios gama com uma eficiência de aproximadamente 13% (KNOLL, 1989). Nesse trabalho foi utilizado o modelo 5I5 X12/1.12 da *Alpha Sepctra, Inc.* (Figura 19).



Figura 19: Cintilometro modelo 5I5X12 da Alpha Spectra, inc.

A eficiência de cintilação de um cintilador é definida como a fracção da energia de todas as partículas incidentes que é transformada em luz visível. O mecanismo de cintilação em materiais inorgânicos depende dos estados de energia determinado pela rede cristalina do material. Uma peça fundamental na construção de um detector de cintilação é o fotomultiplicador, que é responsável pela conversão de sinais luminosos normalmente fracos, produzidos pela radiação, em sinais eléctricos com intensidade suficiente para serem processados em sistemas de contagem ou espectroscopia.

Para ser considerado um cintilador ideal, o material deve possuir as seguintes características (KNOLL, 1989):

- Produzir o maior número possível de fotões por unidade de energia depositada pela radiação incidente, de forma linear;
- Ser construído em dimensões razoáveis que possibilitem que toda a energia depositada pela radiação seja absorvida pelo detector;
- Deve ser transparente à sua própria cintilação para que haja uma boa colecta da luz emitida;
- Possuir um tempo curto de decaimento da luminescência, para que não haja perda dos sinais gerados;
- Deve ter um índice de refacção próximo ao do vidro (~ 1,5), que permita um acoplamento óptico perfeito do detector com o tubo da fotomultiplicadora.

- **Detector PM1703M**

O PM1703M (Figura 20) é um detector de radiação portátil altamente sensível projectado para identificar baixos níveis de materiais radioactivos.



**Figura 20:** Detector portátil PM1703M.

Este equipamento contém um fotodiodo de Iodeto de Césio que é um detector de cintilação altamente sensível (tálio activado) que detecta apenas materiais emissores de raios gama.

A sua faixa de sensibilidade em taxa de dose varia entre 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  e 99,99  $\mu\text{Sv/h}$  e de energia entre 0,033 MeV e 3,0 MeV.

## Capítulo 3

### Recolha de dados

#### 3.1. Preparação e colocação dos detectores passivos

Foram colocados, na Escola Secundária com 3º Ciclo do Ensino Básico da Sé (Guarda), 108 detectores LR-115 II da Kodak-Pathe (manufacturados) e 12 detectores LR-115 II (Figura 19) fornecidos pelo Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN), foram recolhidos 88 detectores LR-115 II da Kodak-Pathe (manufacturados) e a totalidade dos detectores ITN (Figura 21).



Figura 21: Detector ITN.

Cada detector manufacturado consiste em uma fita de LR-115 II da Kodak-Pathe (16mm por 36mm) colocada no interior de uma pequena cápsula (Figura 22) com vista a diminuir o depósito de impurezas e evitar possíveis danos na fita. Praticamente todas as cápsulas foram envolvidas com adesivo negro de forma a evitar danos provocados por uma provável exposição à luz solar.

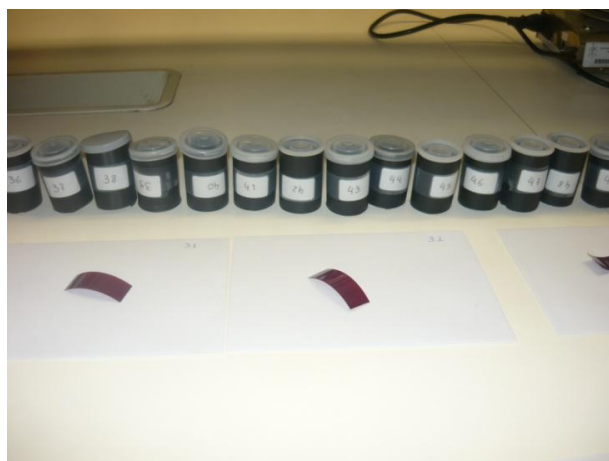


Figura 22: Detectores LR-115 II da Kodak-Pathe (manufacturados).

Para verificar o impacto deste factor assim como da geometria de exposição das fitas ao ar foram feitos quatro cartazes e em cada um foram colocados quatro detectores: um detector ITN (como parte do processo de calibração relativa dos detectores manufacturados), uma fita colocada directamente sem cápsula um detector artesanal com cápsula transparente.

Os detectores foram colocados a cerca de 100cm do solo e distribuídos uniformemente pela área escolar.

O período de exposição variou entre 68 e 70 dias e decorreu entre 11 de Março de 2011 e 25 de Maio do mesmo ano. Foi feito um levantamento da ventilação e dos materiais de construção e revestimento usados nas paredes e no chão da divisão (anexo I)

Utilizando três detectores alfa distintos (mencionados em 2.3.2. e 2.2.3.) foi medida a radiação gama ambiental em praticamente todos os locais onde foram colocados os detectores de radão.

### 3.2. Aferição do método de contagem

O processo de calibração consiste na determinação da resposta do detector em relação a outro de referência, padrão ou de resposta conhecida.

Junto a cada detector fornecido pelo ITN foi colocado pelo menos um detector manufacturado, de forma a ser possível efectuar a calibração destes a partir dos valores de concentração de radão ( $Bq/m^3$ ) fornecidos pelo ITN.

Tabela 3: Concentração de radão (ITN).

Localização	Nº do detector	Tempo de exposição (dias)	Concentração ( $Bq/m^3$ )
Biblioteca -RC	1	68	301
Reprografia	2	68	380
WC-3ºD	3	68	541
WC-4ºD	4	68	414
CS-adm.-RC	5	68	586
Sala 43-Of-RC	6	68	1144
Secretaria -RC	7	68	759
Ar- 2P-BA	8	70	527
B. Aulas - 1 P	9	68	1033
Pavilhão	10	68	796
S3- 2P-BA	11	70	229
Bar-BA-RC	12	68	488

Utilizando a expressão,

$$D = C \times t \times f$$

onde **D** representa a densidade de traços em traços por  $cm^2$ , **C** a concentração de radão em  $Bq/m^3$ , **t** o tempo de exposição em dias e **f** o factor de calibração ( $f = 0,0023 \frac{tr m^3}{Bq d cm^2}$ ) [15] foi possível calcular a densidade de traços.

Tabela 4: Densidade de traços (tr/cm<sup>2</sup>).

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Densidade (tr/cm <sup>2</sup> )
Biblioteca -RC	1	301	471
Reprografia	2	380	594
WC-3ºD	3	541	846
WC-4ºD	4	414	647
CS-adm.-RC	5	586	917
Sala 43-Of-RC	6	1144	1789
Secretaria -RC	7	759	1187
Ar- 2P-BA	8	527	848
B. Aulas - 1 P	9	1033	1616
Pavilhão	10	796	1245
S3- 2P-BA	11	229	369
Bar-BA-RC	12	488	763

Após o ataque químico (definido na secção 2.3.1.) os detectores artesanais foram digitalizados num scanner (NIKON 35 mm Film Scanner LS -1000 com 2700 DPI) permitindo visualizar imagens como a apresentada na Figura 23.



Figura 23: Aspecto da fita do detector artesanal número 96.

No tratamento das imagens digitalizadas foi utilizado o programa LEOWorks (obtido gratuitamente na Internet) que é um sofisticado software de processamento de imagem desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (AEE).

Inicialmente foi definido uma região de análise do filme (Crop) de forma a eliminar factores parasitas, como por exemplo a acumulação de impurezas na extremidade da fita (figura 24).

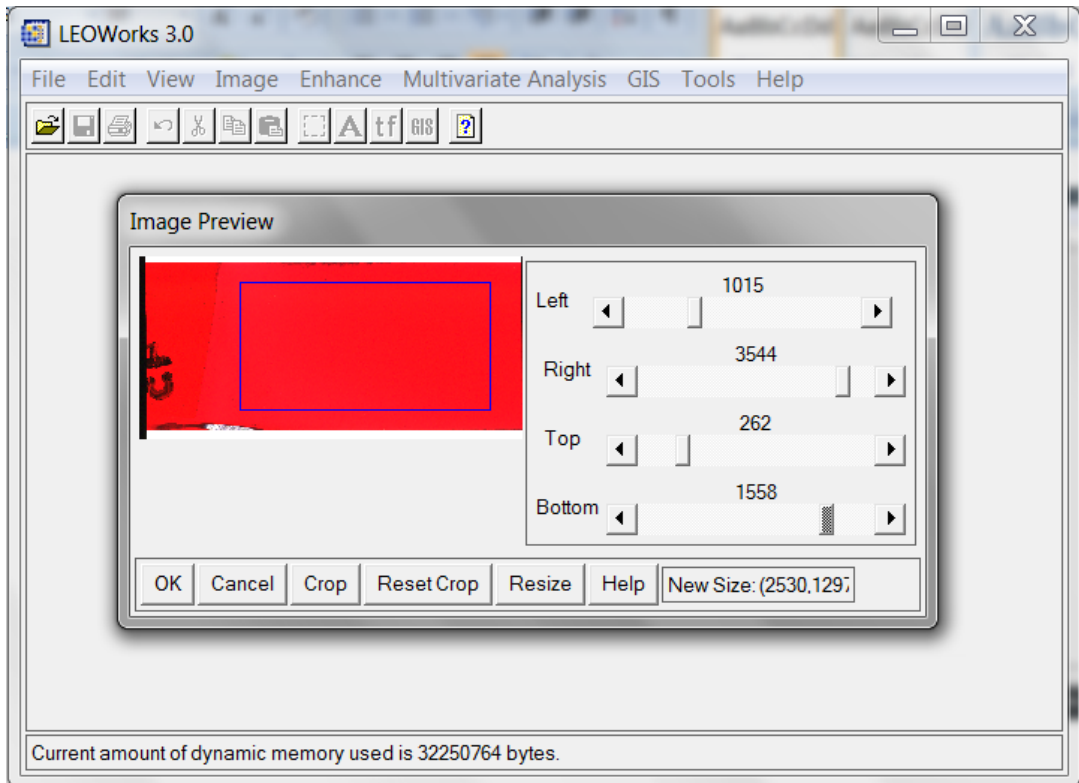


Figura 24: Definição da região de análise do filme (Crop).

De seguida aplica-se à imagem um filtro verde (cor complementar do vermelho) para uma melhor visualização dos traços (função image - slip to - red, green blue). A imagem assim obtida (Figura 25) possui 255 graduações de cor cinza (desde do branco até ao preto) pelo que foi necessário escolher qual a cor que melhor se ajusta aos traços feitos pelos decaimentos alfa.

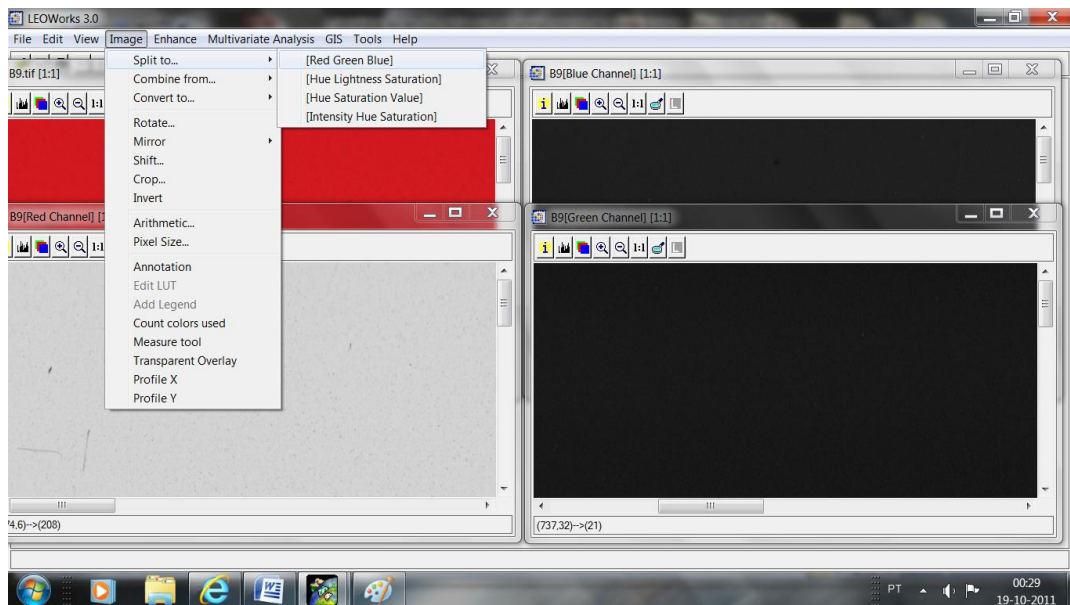


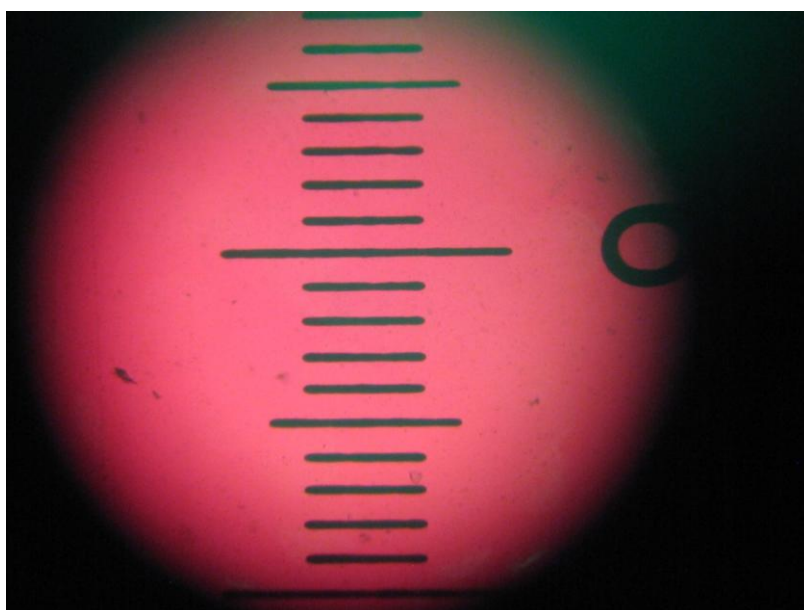
Figura 25: Aplicação de um filtro verde.

Para determinar o limite inferior, na função Interactive Stretching do programa LEOWorks, foi necessário identificar claramente as perfurações resultantes das partículas alfa. Para este efeito, as películas dos detectores artesanais usados na calibração, foram visualizadas e fotografadas com um microscópio óptico (Centro de Óptica da UBI) usando uma ampliação de 50x da imagem original (Figura 26).

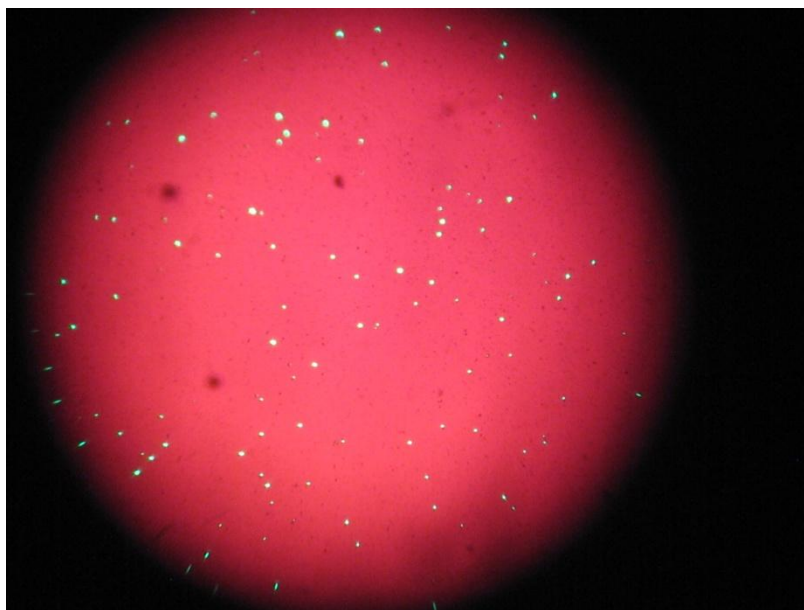


**Figura 26:** Microscópio óptico (gentilmente cedido pelo Centro de Óptica da UBI).

Efectuou-se um varrimento de 20 fotografias para cada detector. Com uma escala micrométrica (Figura 27 A) e após a contagem manual dos traços (Figura 27 B) foi possível obter a sua densidade para estas fitas e usar estes valores para estimar um valor mais provável para o limite inferior na função Interactive Stretching do programa LEOWorks.



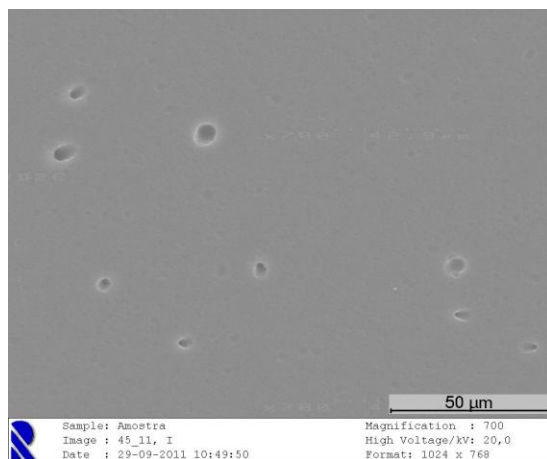
(A)



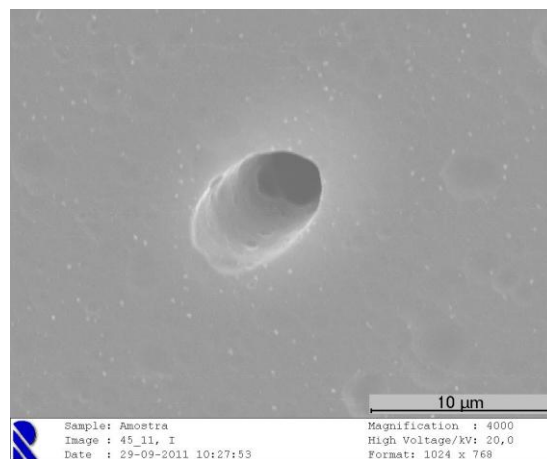
(B)

Figura 27: (A) Escala micrométrica; (B) Densidade de traços observados no detector artesanal número 3.

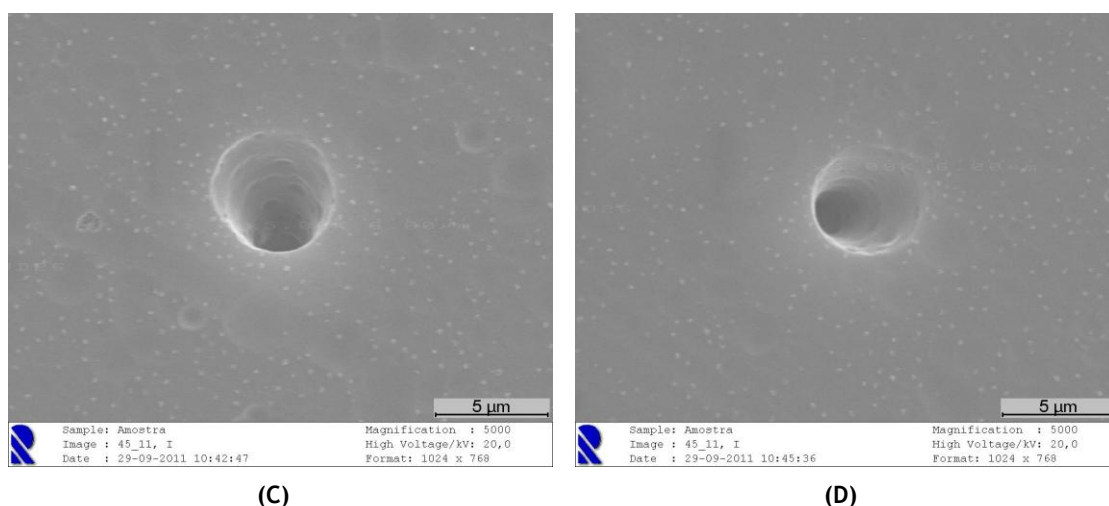
Utilizou-se um microscópio electrónico de varrimento (Figura 28) para visualizar a geometria e o raio médio cuja informação serviu, também, para estimar o valor mais adequado do limite inferior (33 foi o valor utilizado).



(A)

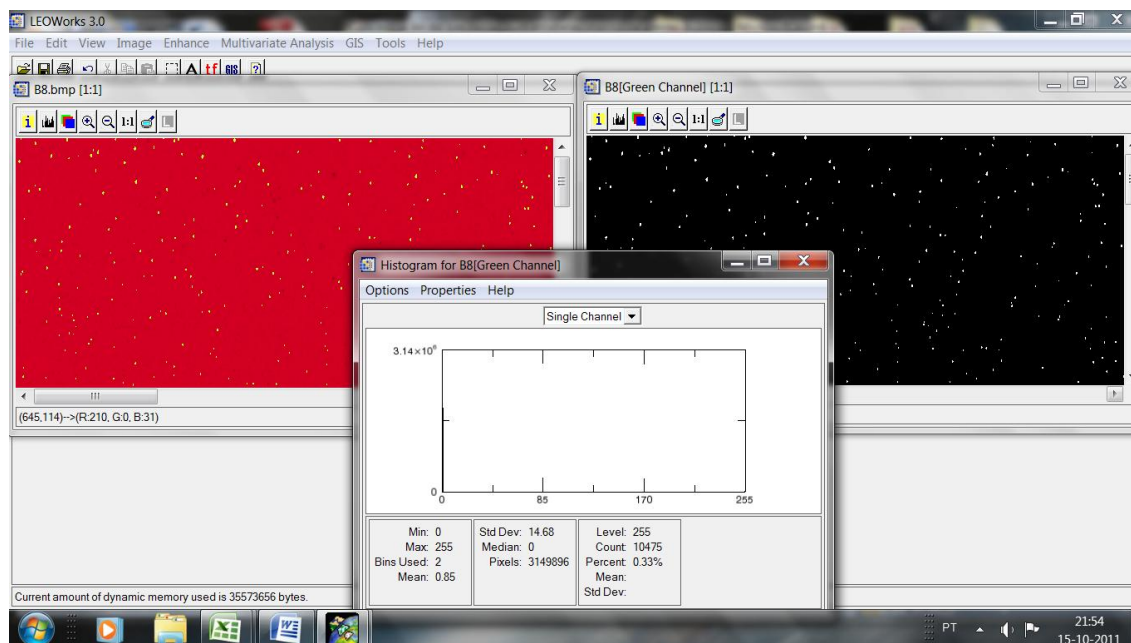


(B)



**Figura 28:** Traço resultante de um decaimento alfa ampliado 700x (Figura A), 4000x (Figura B) e 5000x (Figura C e D) com um microscópio electrónico de varrimento (gentilmente cedido pelo Centro de Óptica da UBI).

Depois de se definir este parâmetro e utilizando o histograma referente ao canal verde retira-se o número total de *pixels* da imagem e o número de *pixels* associados aos decaimentos alfa calcula-se o número de *pixels* por  $\text{cm}^2$  para cada detector (este parâmetro será referido neste trabalho como densidade digital de traços).



**Figura 29:** Programa LEOWorks (Histograma).

No processo de calibração usaram-se detectores artesanais com as mesmas características (cápsula envolvida em adesivo negro). Dos doze detectores iniciais foram validados oito. Na tabela 4 estão indicados os valores para a densidade digital de traços.

Tabela 5: Densidade digital de traços (pixel/cm<sup>2</sup>).

ITN	Detector	Número Total Pixels	Área (cm <sup>2</sup> )	Número de Pixels dos Traços	Densidade Digital (pixels/cm <sup>2</sup> )	Densidade (tr/cm <sup>2</sup> )
1	76	2987754	2,49746	1208	483,6907	471
2	77	2987754	2,49746	1411	564,9732	594
3	98	2987754	2,49746	2239	896,5096	846
4	78	2987754	2,49746	1633	653,8634	648
5	5	3072940	2,56867	2430	946,0147	917
8	85	3041120	2,54207	2513	988,5636	848
9	68	3041120	2,54207	4730	1860,687	1616
11	88	3041120	2,54207	835	328,4722	367

Os valores da densidade digital de traços foram correlacionados com a densidade de traços dos detectores ITN (Figura 30).

Foi obtido um ajuste linear forte entre as variáveis, com um coeficiente de determinação de (R<sup>2</sup>) de 0,9929 e de correlação (R) 0,9964.

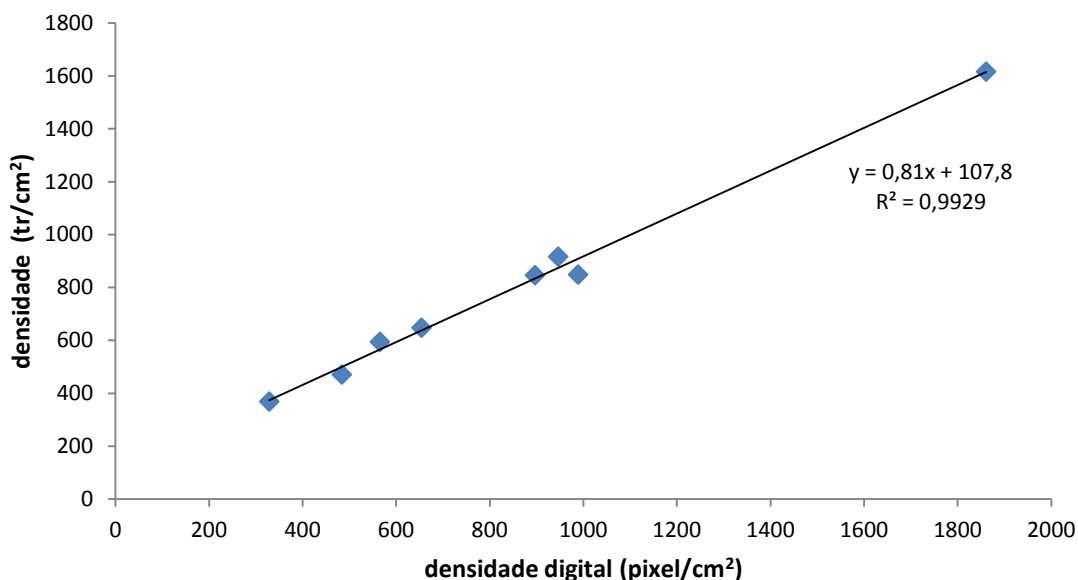


Figura 30: Densidade (tr/cm<sup>2</sup>) em função da densidade digital (pixel/cm<sup>2</sup>).

A função de calibração considerada foi,

$$D = 0,81 \times P + 107,8 \quad (5)$$

onde D representa a densidade de traços em traços por cm<sup>2</sup>, P a densidade digital de traços em pixel por cm<sup>2</sup>. Esta função foi utilizada para obter a concentração de radão dos restantes detectores artesanais.

# Capítulo 4

## Resultados e discussão

### 4.1. Caracterização da escola e dos espaços analisados

A Escola está situado no centro urbano da Guarda, é constituída por um edifício principal (Bloco de Aulas e bloco Administrativo) e um pavilhão ginnodesportivo. A escola tem 38 salas de aula dispersas num corpo principal constituído por rés-do-chão, 1º, 2º, 3º, 4º e 5º pisos. Dispõe ainda de um espaço de convívio para alunos, um Bufete, um Refeitório e um Salão de Festas onde decorrem aulas de Educação Física.

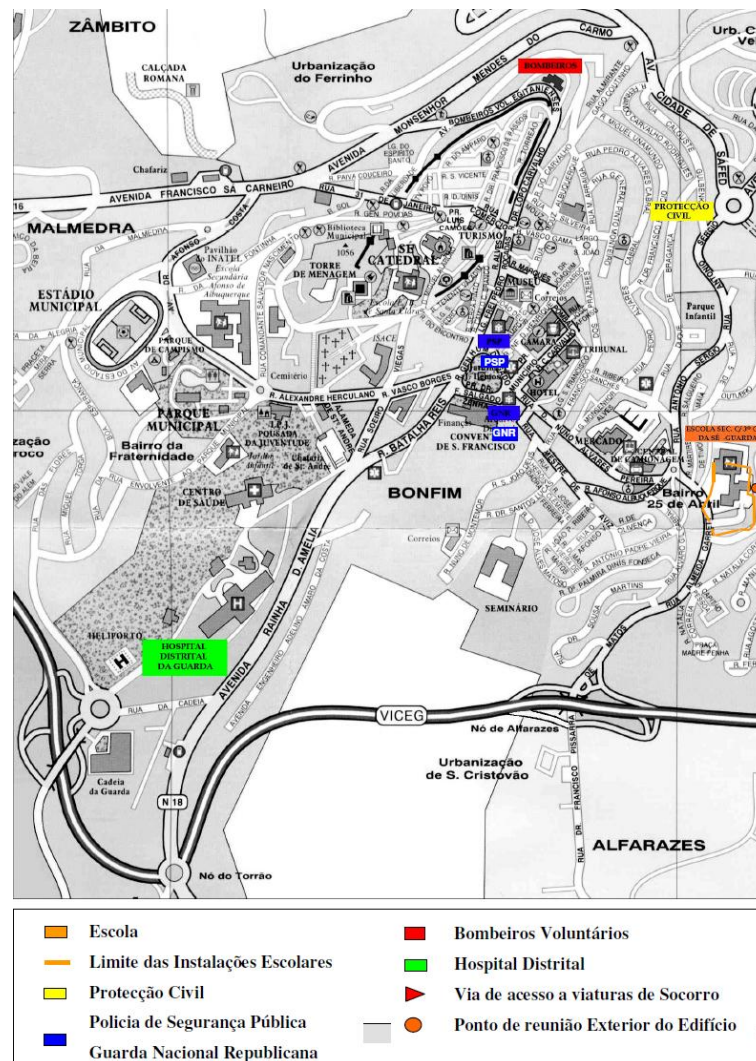


Figura 31: Planta de Localização da Escola.

Em termos geológicos a Escola Secundária da Sé assenta essencialmente sobre granito biotítico, com alguma moscovite, porfiróide, de grão grosseiro.

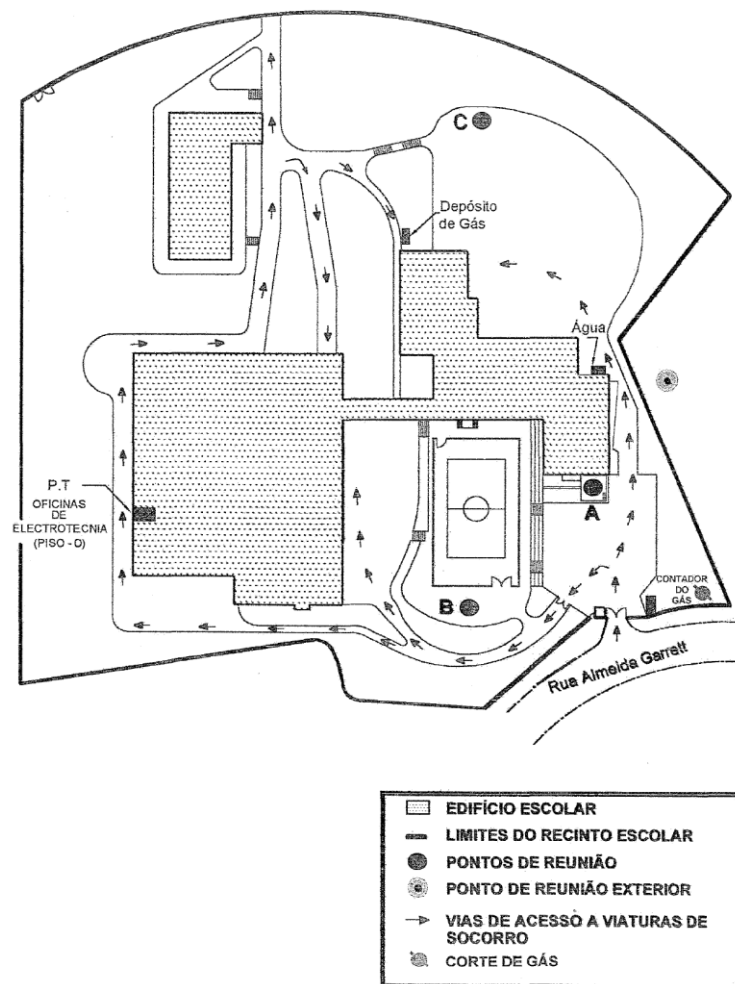


Figura 32: Planta de Enquadramento.

## 4.2. Distribuição da concentração de radão

### 4.2.1 Distribuição horizontal

Os valores obtidos para a concentração de radão por piso e no Pavilhão Gimnodesportivo e a sua distribuição horizontal são os seguintes:

Na tabela 6 e na figura 33, estão indicados os valores obtidos para o Rés-do-Chão (Oficinas - Bloco de Aulas).

Tabela 6: Concentração de radão para o R/C.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Corredor	18	123	OTX	16	326
O Elect.	11	134	LME	17	186
S Elect.	12	72	LMC	19	75
OTX	14	80	O Mec	20	93
Arrumos	15	158	TOM	23	446

Este piso apresenta concentração média de 169 Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 72Bq/m<sup>3</sup> e 446Bq/m<sup>3</sup>.



Figura 33: Distribuição de concentração de radão no RC.

## Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

As zonas identificadas a verde possuem uma concentração de radão igual ou inferior a 200 Bq/m<sup>3</sup>, a amarelo entre 200 Bq/m<sup>3</sup> (exclusivo) e 400 Bq/m<sup>3</sup> (inclusivo), a laranja entre 400 Bq/m<sup>3</sup> (exclusivo) e 1000 Bq/m<sup>3</sup>(inclusivo) e a vermelho superior a 1000 Bq/m<sup>3</sup>.

Para o cálculo da média deste piso, não estão a ser contabilizado os dois detectores colocados nas galerias directamente sobre maciço rochoso (granito). Os valores obtidos são 1709Bq/m<sup>3</sup> e 1916Bq/m<sup>3</sup> que, como se esperava, são superiores aos restantes do mesmo piso.

Na tabela 7 e na figura 34, estão indicados os valores obtidos para o 1º Piso (1º Piso do Bloco de Aulas e Refeitório).

Tabela 7: Concentração de radão para o 1º Piso.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Refeitório	67	1788	L. Geral	74	656
Ofic. Manut.	68	1003	Arrumos	75	1231
Câmara Escura	70	953	Arrumos P.	82	1540
L. Física	71	166			

Este piso apresenta concentração média de 1048Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 166Bq/m<sup>3</sup> e 1788Bq/m<sup>3</sup>.



Figura 34: Distribuição de concentração de radão no 1º Piso.

## Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Na tabela 8 e na figura 35, estão indicados os valores obtidos para o 2º Piso (2º Piso do Bloco de Aulas e RC do Bloco Administrativo).

Tabela 8: Concentração de radão para o 2º Piso.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Secretaria	3	607	S1	83	1327
CS-adm.	4	947	S2	84	374
C. Executivo	5	559	Arrumos	85	564
CS-adm.	63	553	S3	88	232
Papelaria	64	145	S4	90	304
Bar	65	326	S6	92	330
Reprografia	77	362	Sala de Estudo	94	1664

Este piso apresenta concentração média de 592Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 145Bq/m<sup>3</sup> e 1664Bq/m<sup>3</sup>.

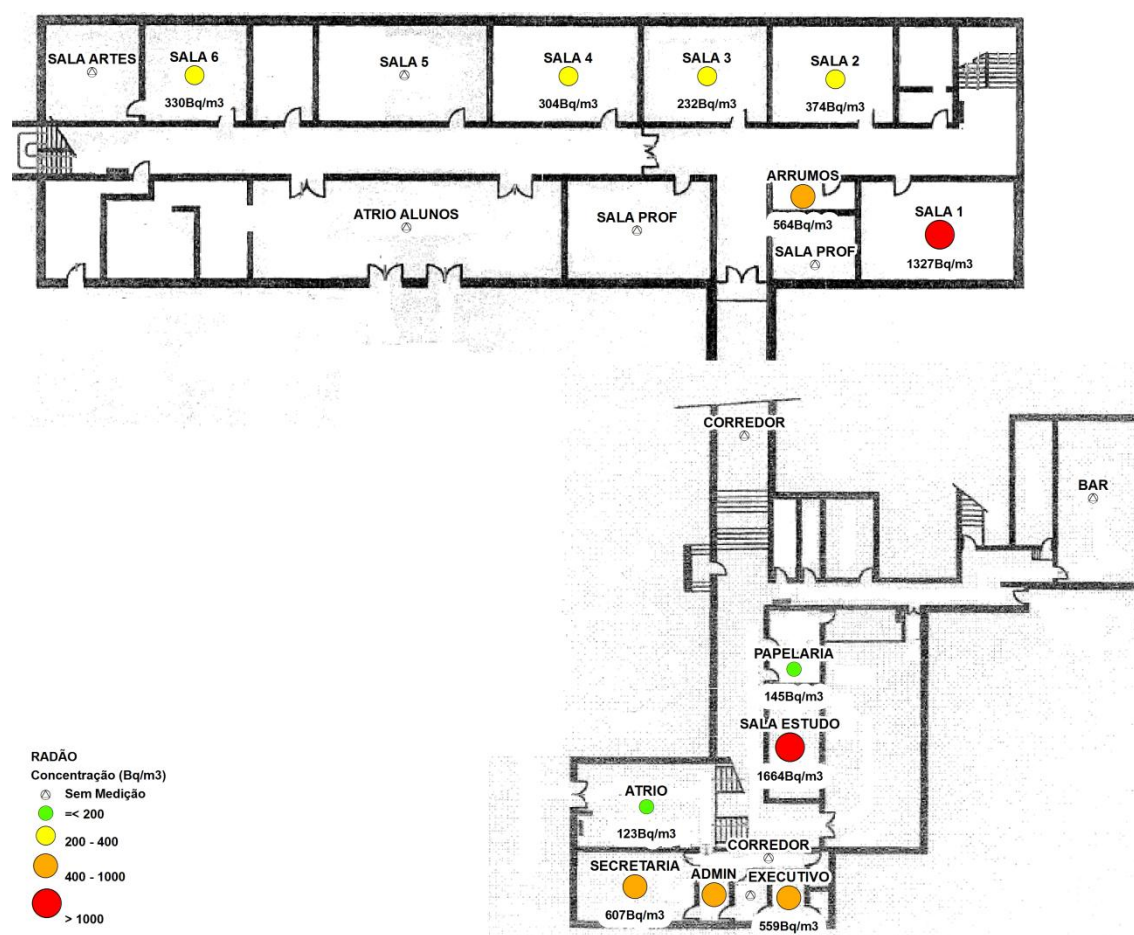


Figura 35: Distribuição de concentração de radão no 2º Piso.

## Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Na tabela 9 e na figura 36, estão indicados os valores obtidos para o 3º Piso (3º Piso do Bloco de Aulas e 1º Piso do Bloco Administrativo).

Tabela 9: Concentração de radão para o 3º Piso.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Arquivo 1	6	111	S10B	32	142
Arquivo 2	7	133	S18	33	96
SASE	2	408	S16	34	188
S8	25	169	S14	35	149
S10	26	114	S12	36	183
S13	27	624	S11	37	226
S15	28	435	S9	38	236
S17	29	277	S7	39	495
S19	30	233	WC	98	533
S20	31	184			

Este piso apresenta concentração média de 260Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 96Bq/m<sup>3</sup> e 624Bq/m<sup>3</sup>.



Figura 36: Distribuição de concentração de radão no 3º Piso.

Na tabela 10 e na figura 37, estão indicados os valores obtidos para o 4º Piso (4º Piso do Bloco de Aulas).

Tabela 10: Concentração de radão para o 4º Piso.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Corredor	40	597	S33	48	244
S22	41	105	S32	49	654
S24	42	479	S30	50	222
S24A	43	190	S28	51	377
S27	44	276	S26	52	120
S29	45	186	S23	54	81
S31	46	355	WC	78	408
Minerva	47	648			

Este piso apresenta concentração média de 329Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 81Bq/m<sup>3</sup> e 654Bq/m<sup>3</sup>.

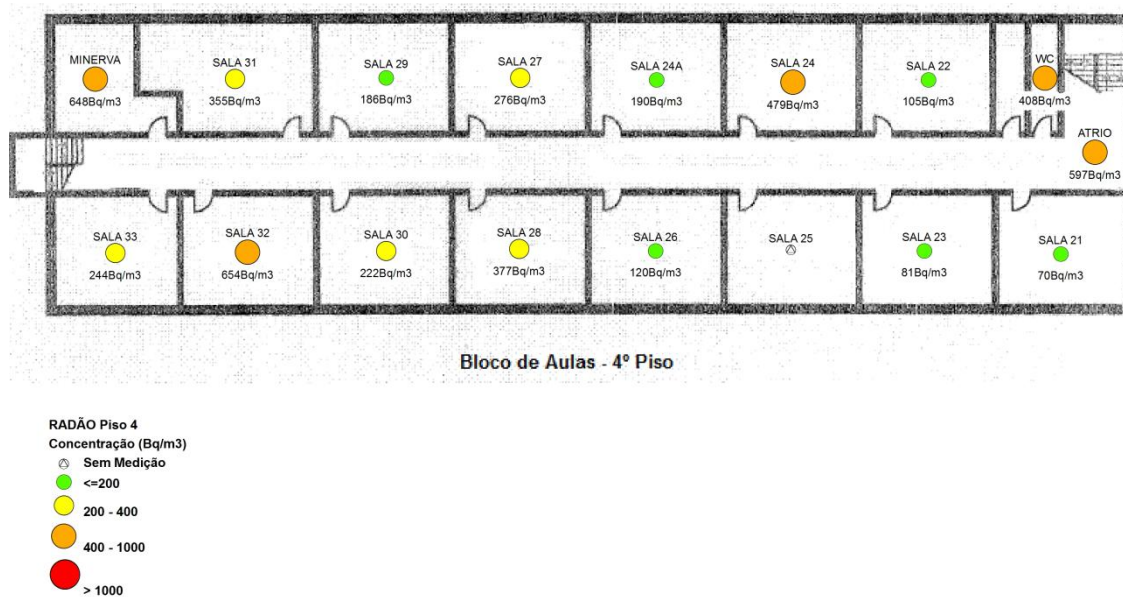


Figura 37: Distribuição de concentração de radão no 4º Piso.

## Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Na tabela 11 e na figura 38, estão indicados os valores obtidos para o 5º Piso (5º Piso do Bloco de Aulas).

Tabela 11: Concentração de radão para o 5º Piso.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Arrecadação	100	268	S37	59	81
S34	55	73	S38	60	1540
S35	57	71	S39	61	412
S36	58	75	S40	62	679

Este piso apresenta concentração média de 400Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 71Bq/m<sup>3</sup> e 1540Bq/m<sup>3</sup>.

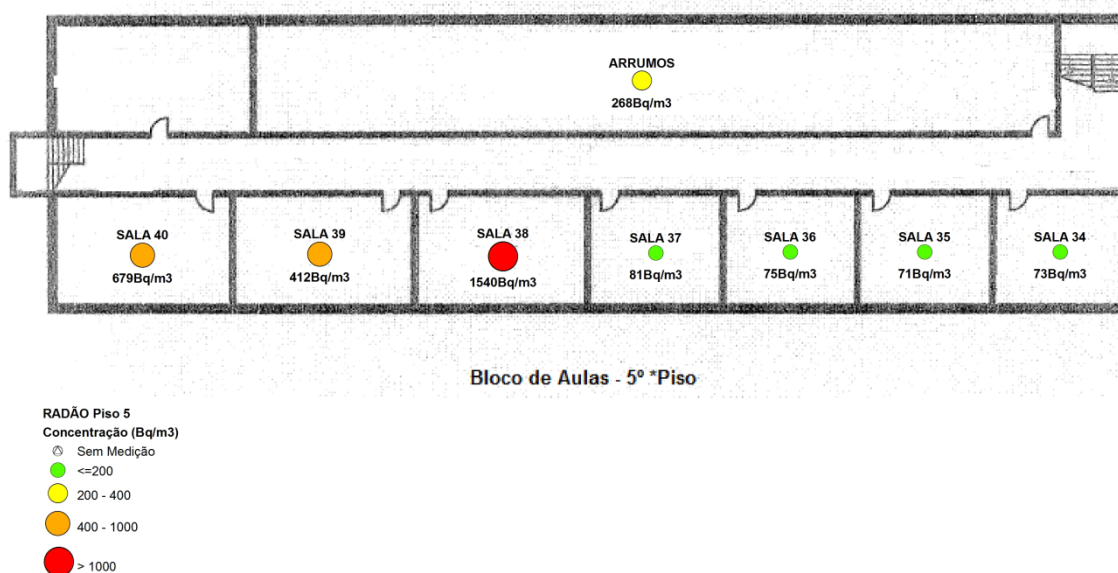


Figura 38: Distribuição de concentração de radão no 5º Piso.

Na tabela 12 e na figura 39, estão indicados os valores obtidos para o Pavilhão Gimnodesportivo.

Tabela 12: Concentração de radão para o Pavilhão Gimnodesportivo.

Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Localização	Nº do detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
Pavilhão	95	2757	Pavilhão	96	909

Este piso apresenta concentração média de 1833Bq/m<sup>3</sup>, valor mínimo e máximo respectivamente de 909Bq/m<sup>3</sup> e 2757Bq/m<sup>3</sup>.

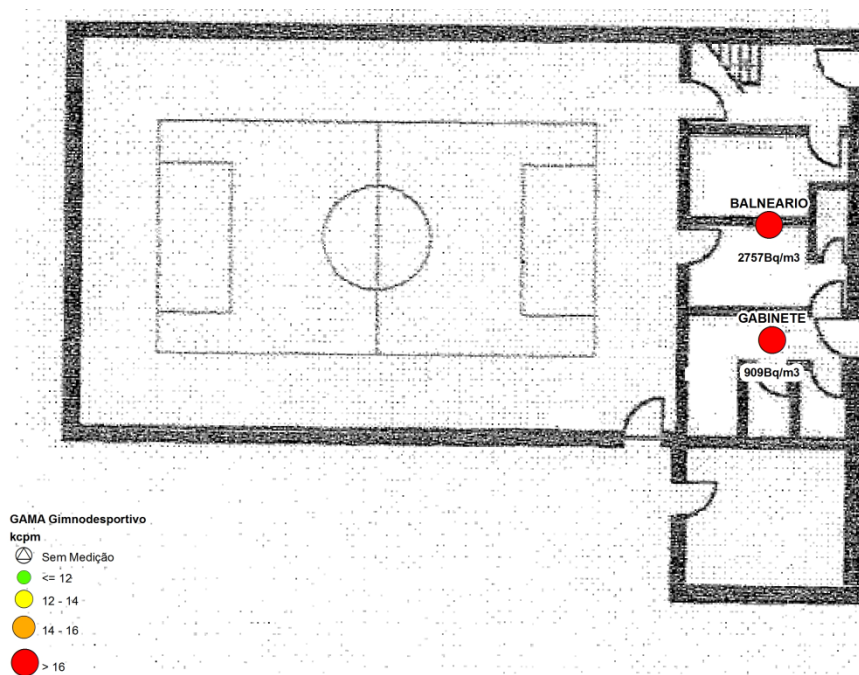


Figura 39: Distribuição de concentração de radão no pavilhão gimnodesportivo.

A Figura 40 indica a distribuição média de concentração de radão pelos 6 pisos indicados, RC corresponde as oficinas localizadas no R/C do bloco de aulas, 1º Piso corresponde ao 1º piso de Bloco de Aulas e ao Refeitório, o 2º Piso equivale ao 2º piso do Bloco de Aulas e ao R/C do Bloco Administrativo, o 3º Piso ao 3º piso do Bloco de Aulas e ao 1º piso do Bloco Administrativo, o 4º Piso ao 4º piso do Bloco de Aulas e o 5º Piso ao 5º piso do bloco de aulas. As cores utilizadas são as mesmas que as utilizadas na distribuição de densidades da concentração de radão.

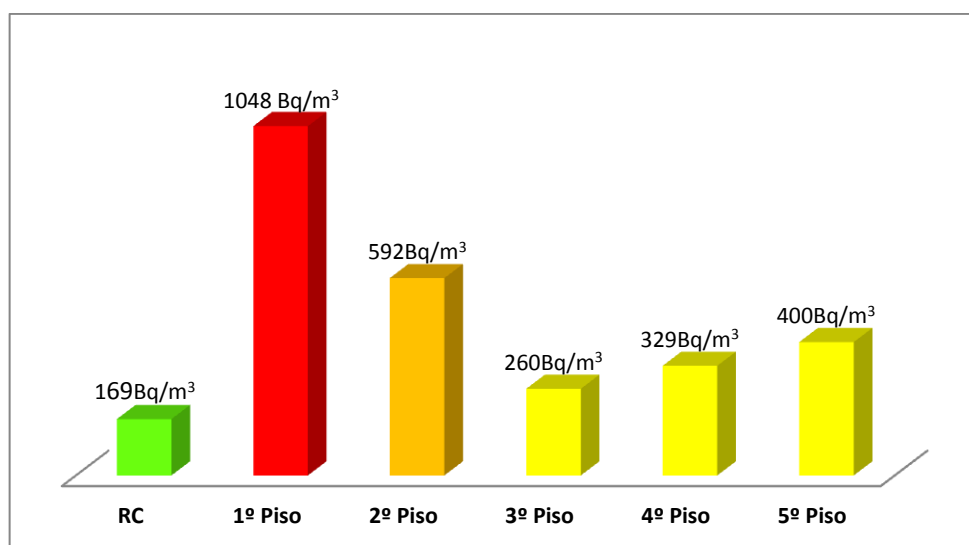


Figura 40: Distribuição média de concentração de radão por Piso.

Verifica-se que em média a concentração de radão ultrapassa o valor limite estipulado no 1º piso e no 2º piso. No 1º Piso o valor ultrapassa os 600Bq/m³ (valor limite

acrescido de 50%). O rés-do-chão (RC), contrariamente ao que seria de esperar, é aquele que apresenta menor valor de concentração, supões-se que este resultado se deva ao bom arejamento (espaços amplos com circulação de ar) de maioria das divisões.

Na figura 40 estão indicadas as distribuições médias de concentração de radão pelos 6 pisos que constituem o Bloco de Aulas.

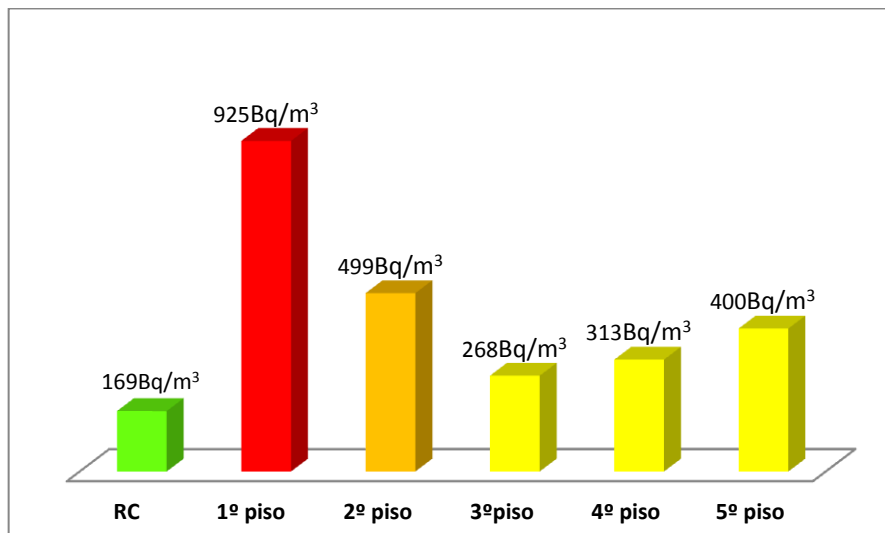


Figura 41: Distribuição média de concentração de radão pelos 6 pisos que constituem o Bloco de Aulas.

Na figura 41 estão indicadas as distribuições médias de radão no Bloco Administrativo e no Pavilhão Gimnodesportivo.

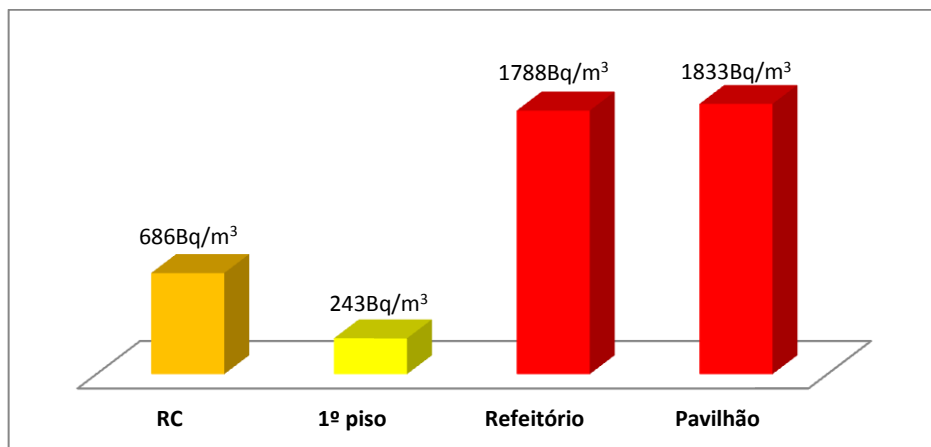


Figura 42: Distribuição média de concentração de radão no Bloco Administrativo e no pavilhão.

O 1º e 2º piso do Bloco de Aulas apresentam concentração média de radão superior a  $400\text{Bq/m}^3$ . Relativamente ao Bloco Administrativo só o 1º piso apresenta valor de concentração de radão inferior a  $400\text{Bq/m}^3$ .

O valor médio da concentração de radão considerando toda a área escolar é  $479\text{Bq/m}^3$ .



### 4.3. Distribuição de radiação gama

A figura 44 representa a distribuição de radiação gama no concelho da Guarda. Os valores da Taxa de Exposição estão indicados em nGy/h.

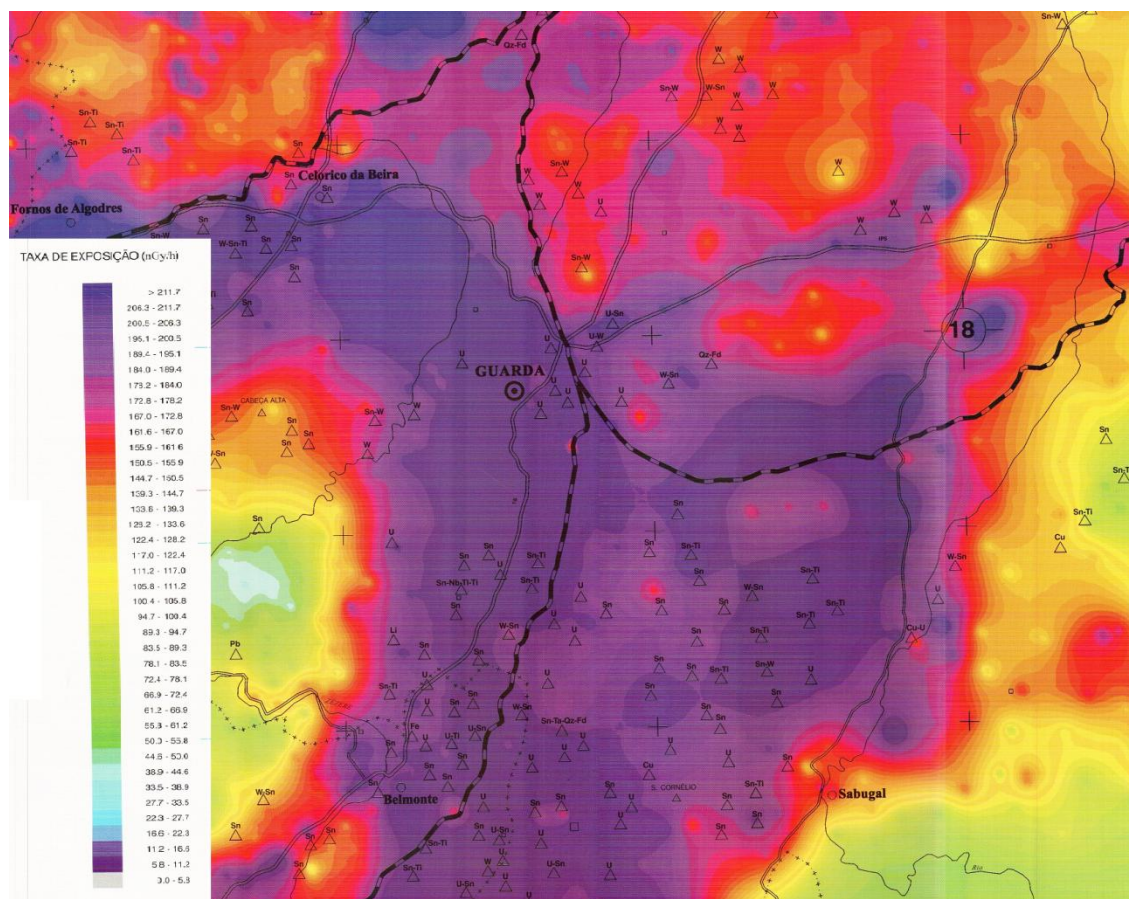


Figura 44: Carta de radiação gama da do Conselho da Guarda [17].

Devido às suas características geológicas, a cidade da Guarda, apresenta uma elevada incidência de radiação gama, verificando-se consistentemente, em toda a sua extensão valores superiores a 200 nGy/h.

Os valores de radiação gama obtidos com o detector Geiger FH40F (FH), o detector de Cintilação 515 X12/1.12 (C) e o detector PM1703M (PM) encontram-se no anexo I.

Para traçar o perfil horizontal de radiação gama usaram-se os valores do detector de Cintilação 515 X12/1.12, pois é o que apresenta maior sensibilidade.

### 4.3.1. Distribuição horizontal

Na tabela 13 e na figura 45 estão indicados os valores de distribuição horizontal da concentração de radiação gama obtidos no r/c.

Tabela 13: Radiação gama para o RC.

Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)	Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)
Corredor	18	16,96	OTX2	16	17,58
O Elect.	11	15,65	LME	17	17,46
S Elect.	12	17,83	LMC	19	16,94
OTX	14	18,08	O Mec	20	14,68
Arrumos	15	17,83	TOM	23	17,00
S41	10	18,42	SMC	21	16,86
L Electr.	13	17,36			

Este piso apresenta um valor médio de 17,10kcpm, valor mínimo e máximo respectivamente de 14,68kcpm e 18,42kcpm.

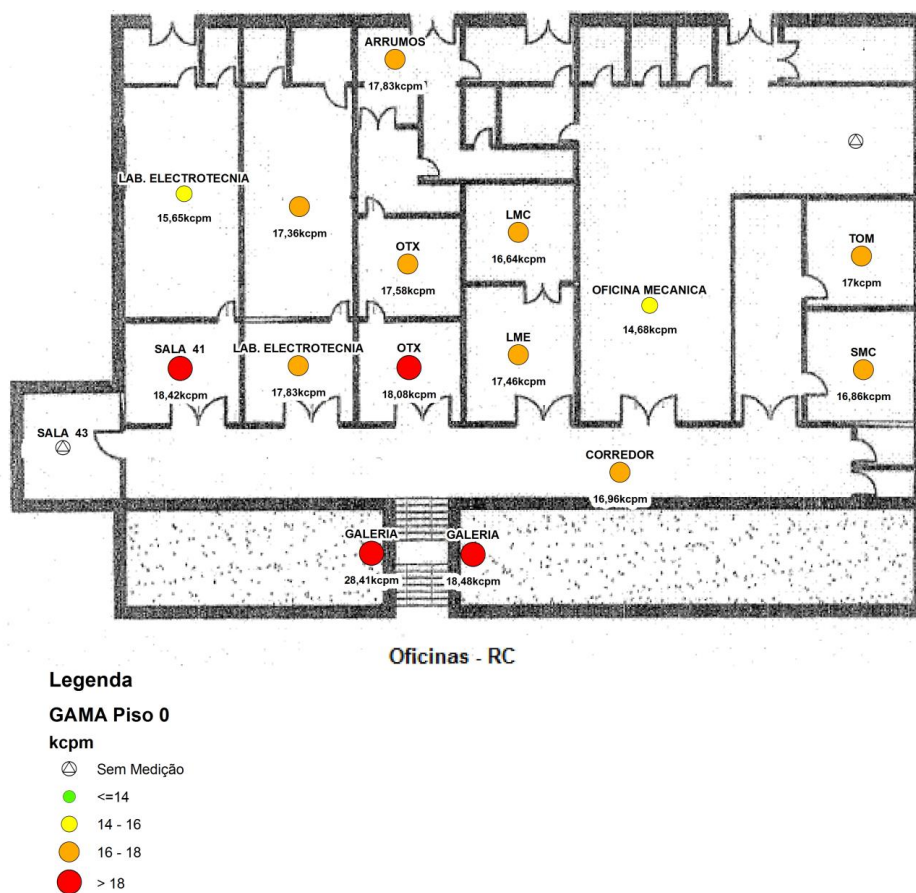


Figura 45: Distribuição de radiação gama no RC.

O código de cores utilizado para a radiação gama não corresponde a parâmetros directamente relacionados com normativas de exposição ou risco de saúde pública, tendo sido simplesmente seleccionadas 4 classes de distribuição de entre a amplitude de valores registados. As zonas identificadas a verde possuem valor igual ou inferior a 14kcpm, a amarelo entre 14kcpm (exclusivo) e 16kcpm (inclusivo), a laranja entre 16kcpm (exclusivo) e 18kcpm (inclusivo) e a vermelho superior a 18kcpm.

Na Tabela 14 encontram-se os valores obtidos para o 1º Piso (1º Piso do Bloco de Aulas e Refeitório).

Tabela 14: Radiação gama para o 1º Piso.

Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)	Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)
Cozinha	66	16,67	L. Física	71	16,79
Refeitório	67	16,67	L. biologia	72	14,83
Ofic. manut.	68	17,05	L. Geologia	73	15,78
L. Química	69	15,18	L. Geral	74	15,95
Arrumos	70	13,74	Arrumos	75	14,07

Este piso apresenta um valor médio de 15,67kcpm e valores mínimo e máximo de 13,74kcpm e 17,04kcpm, respectivamente.

A distribuição de densidades para este piso está indicada na Figura 46.



Figura 46: Distribuição da radiação gama no 1º Piso.



Na Tabela 16 encontram-se os valores obtidos para o 3º Piso (3º Piso do Bloco de Aulas e 1º Piso do Bloco Administrativo).

Tabela 16: Radiação gama para o 3º Piso.

Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)	Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)
Arquivo1	6	12,57	S20	31	15,60
Arquivo2	7	13,73	S10B	32	14,17
Biblioteca	1	11,38	S18	33	15,41
WC	79	15,66	S16	34	15,08
S8	25	14,18	S14	35	15,07
S10	26	14,4	S12	36	15,39
S13	27	14,88	S11	37	15,22
S15	28	15,10	S9	38	15,26
S17	29	14,88	S7	39	15,29
S19	30	15,03			

Este piso apresenta concentração média de 14,65kcpm, e valores mínimo e máximo de 11,38kcpm e 15,66kcpm, respectivamente.

A distribuição de densidades para este piso está indicada na Figura 48.



Figura 48: Distribuição de radiação gama no 3º Piso.

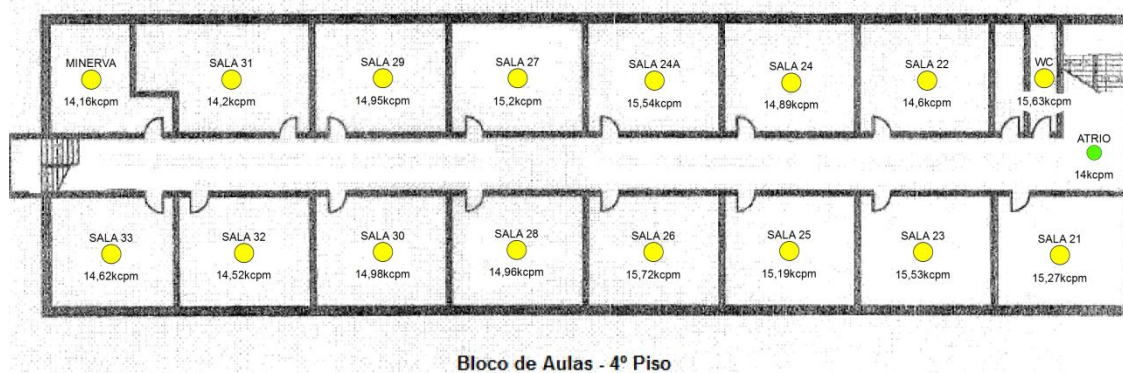
Na Tabela 17 encontram-se os valores obtidos para o 4º Piso (4º Piso do Bloco de Aulas).

Tabela 17: Radiação gama para o 4º Piso.

Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)	Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)
Corredor	40	14	S32	49	14,52
S22	41	14,16	S30	50	14,98
S24	42	14,89	S28	51	14,96
S24A	43	15,54	S26	52	15,72
S27	44	15,2	S25	53	15,19
S29	45	14,95	S23	54	15,53
S31	46	14,2	S34	55	13,57
Minerva	47	14,16	S21	56	15,27
S33	48	14,62	WC	78	15,63

Este piso apresenta concentração média de 14,84kcpm, e valores mínimo e máximo de 13,57kcpm e 15,72kcpm, respectivamente.

A distribuição de densidades para este piso está indicada na Figura 49.



**Legenda**

**GAMA Piso 4**

**kcpm**

- ⊖ Sem Medição
- ≤14
- 14 - 16
- 16 - 18
- > 18

Figura 49: Distribuição de radiação gama no 4º Piso.

## Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

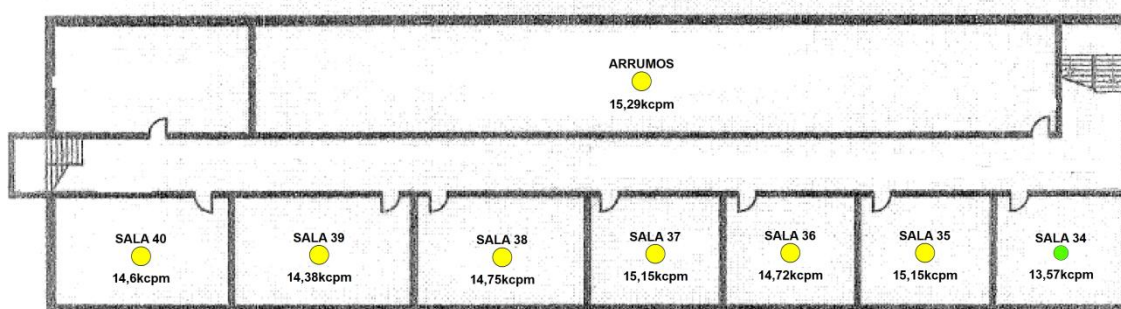
Na Tabela 18 encontram-se os valores obtidos para o 5º Piso (5º Piso do Bloco de Aulas).

Tabela 18: Radiação gama para o 5º Piso.

Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)	Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)
S35	57	15,15	S39	61	14,38
S36	58	14,72	S40	62	14,6
S37	59	15,15	S34	102	13,57
S38	60	14,75	Arrec.	100	15,29

Este piso apresenta concentração média de 14,70kcpm, e valores mínimo e máximo de 13,57kcpm e 15,29kcpm, respectivamente.

A distribuição de densidades para este piso está indicada na Figura 50.



Bloco de Aulas - 5º \*Piso

### Legenda

#### GAMA Piso 5

#### kcpm

- ⊙ Sem Medição
- ≤14
- 14 - 16
- 16 - 18
- > 18

Figura 50: Distribuição de radiação gama no 5º Piso.

Na Tabela 19 encontram-se os valores obtidos para o Pavilhão Gimnodesportivo.

Tabela 19: Radiação gama para o Pavilhão Gimnodesportivo.

Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)	Localização	Nº do detector	Medida (kcpm)
Pavilhão1	95	17,40	Pavilhão2	96	909

Este piso apresenta concentração média de 16,75kcpm. A distribuição de densidades para este piso está indicada na Figura 51.

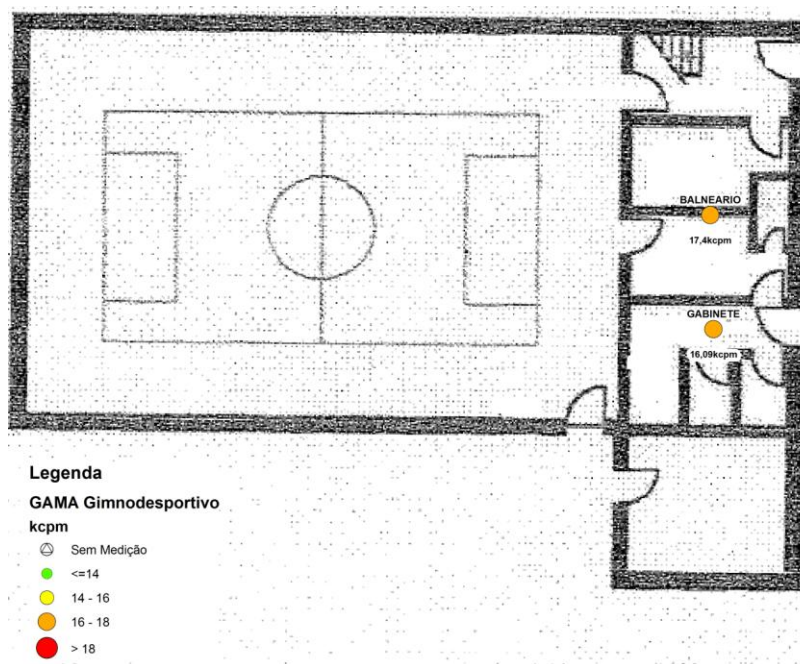


Figura 51: Distribuição de radiação gama no pavilhão gimnodesportivo.

Na figura 52 está representada, graficamente, a distribuição média de radiação gama pelos 6 pisos indicados.

As cores indicadas são as mesmas que as utilizadas na distribuição de densidades de radiação gama.

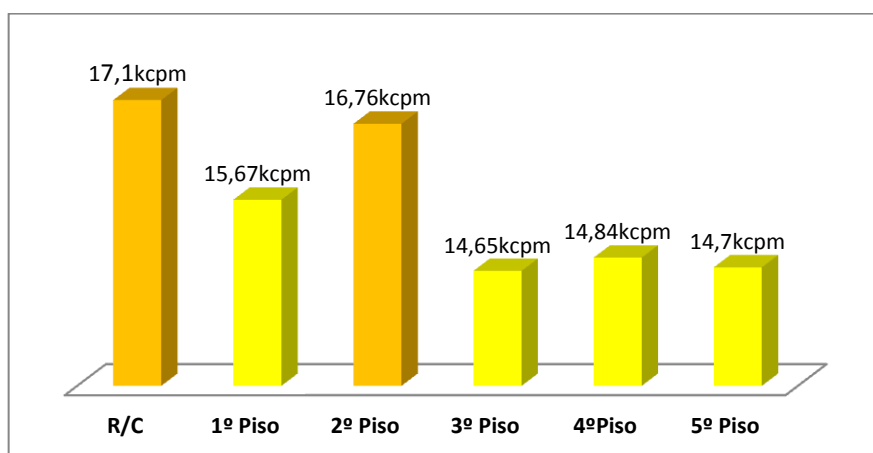


Figura 52: Distribuição média de radiação gama.

Verifica-se que em média o R/C e o 2º piso apresentam os valores mais elevados para a radiação gama. O que nos dá indicação de uma proximidade à fonte responsável pela emissão desta radiação.

Na figura 53 está representada, graficamente, a distribuição média de radiação gama pelos 6 pisos que constituem o Bloco de Aulas.

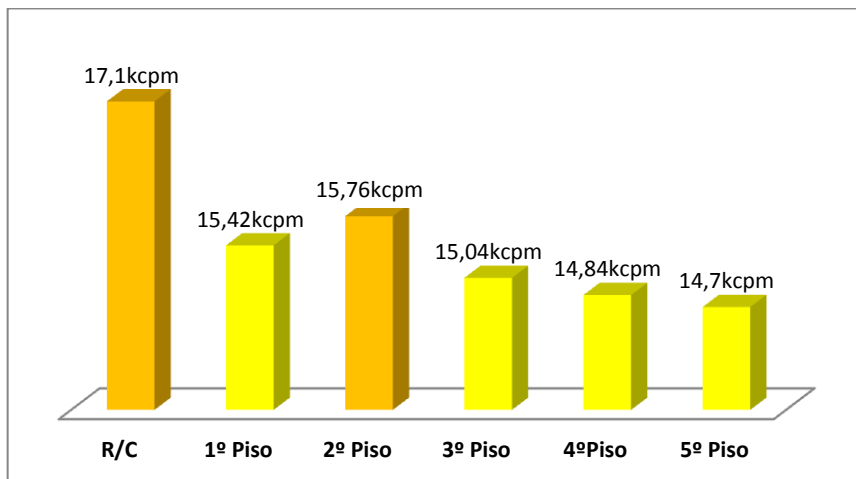


Figura 53: Distribuição média de radiação gama pelos 6 pisos que constituem o Bloco de Aulas.

Neste bloco, o R/C e o 2º piso, apresentam os valores médios mais elevados. Na figura 54 está representada, graficamente, a distribuição média de radiação gama no Bloco Administrativo e no Pavilhão Gimnodesportivo.

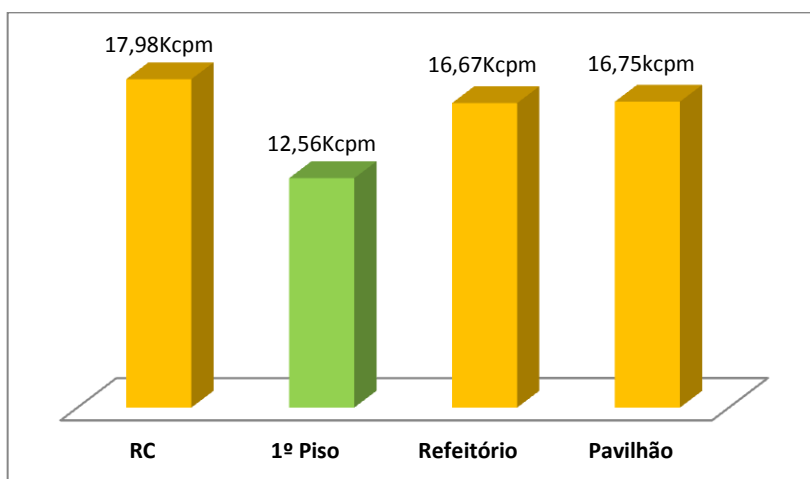


Figura 54: Distribuição média de radiação gama no Bloco Administrativo e no Pavilhão Gimnodesportivo.

O 1º piso do bloco Administrativo (que inclui a biblioteca e o SASE) apresenta menor valor de radiação natural e o R/C (que inclui o Conselho Executivo, o Conselho Administrativo, a Secretária, a Sala de Estudo) apresenta os valores mais elevados de radiação gama.

O valor médio da radiação gama considerando toda a área escolar é 15,67kcpm.

### 4.3.2. Distribuição Vertical

A figura 42 representa um mapa de densidades de radiação gama baseado no somatório das medições.

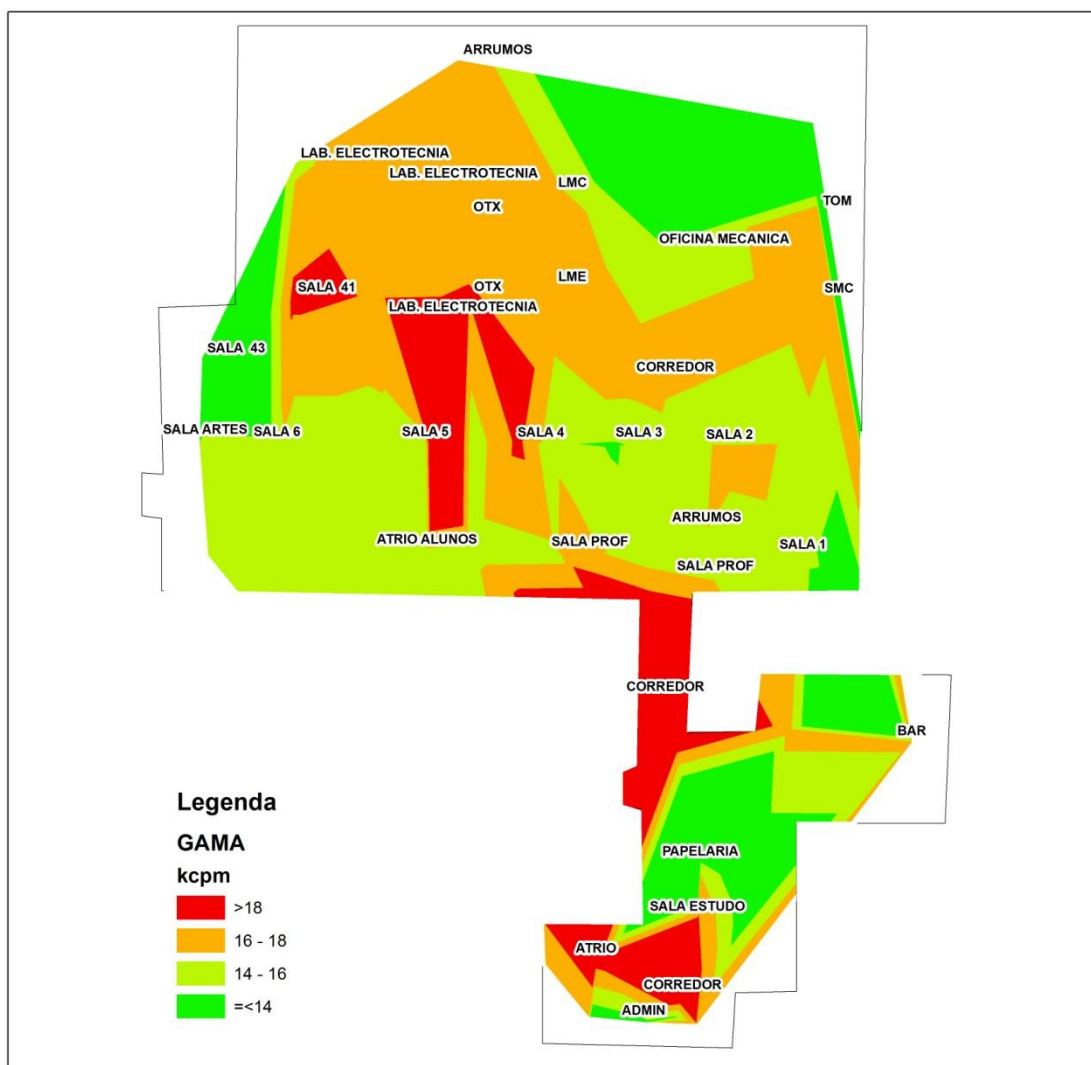


Figura 55: Mapa de densidades de radiação gama do edifício principal (Bloco de Aulas e Bloco Administrativo).

A distribuição da radiação gama na escola é heterogénea, no entanto, verifica-se alguns núcleos que sugerem alguma orientação dos valores, que podem estar relacionados com a geologia do local. Tal como esperado, os valores de radiação gama são tendencialmente mais elevados nos pisos mais baixos, logo mais próximos do maciço rochoso que lhe serve de fundação.

#### 4.4. Modo de colocação dos detectores

Foi feito um estudo preliminar para avaliar o impacto da geometria de exposição das fitas assim como da sua exposição á luz solar.

Na tabela 20 estão representados os valores de concentração de radão para as diferentes situações, em que CP designa detector dentro de uma cápsula preta, CB detector dentro de uma cápsula transparente e F detector colocado directamente. No caso dos detectores CP e CB o detector (fita) é colocado no interior da cápsula cilíndrica, acompanhando a curvatura desta e com a parte sensível exposta ao ar.

Tabela 20: Valores de concentração de radão: detectores CP, CB e F.

Detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Detector	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
ITN(1)	325	ITN(3)	541
CP(76)	319	CP(98)	533
CB(1)	509	CB(4)	-----
F(1)	894	F(4)	612
ITN(2)	380	ITN(4)	414
CP(77)	362	CP(78)	408
CB(2)	411	CB(3)	606
F(2)	772	F(3)	745

Nas análises efectuadas, foram obtidos valores consistentes da concentração de radão, verificando-se um aumento sequencial CP, CB e F.

Embora se trate de uma análise preliminar, que necessita de ser aprofundada, podemos concluir com base nos resultados obtidos que, a concentração de radão utilizando detectores LR-115 II, está relacionado com a geometria de exposição das fitas e com a exposição á luz solar.

## Conclusões

Os objectivos delineados para este trabalho foram plenamente conseguidos, ultrapassando em alguns casos as expectativas iniciais. Foram identificadas com sucesso zonas de incidência de elevadas concentrações do gás radioactivo radão no interior da Escola Secundária da Sé e identificadas as áreas prioritárias em termos de aplicação de um eventual Plano de Mitigação.

Paralelamente foi desenvolvido um método simples e eficaz para contagem da densidade de traços e posterior cálculo da concentração de radão, embora este método ainda se encontre em estado embrionário, o seu aperfeiçoamento, desenvolvimento e aplicação, irá permitir reduzir significativamente o tempo e custo associado à medição de radão. As medidas de actividade alfa e gama, no interior de edifícios, são de vital importância, visto que, se um elevado teor de radão afectar a qualidade do ar interior, a sua inalação poderá causar um problema de saúde pública.

Existe um vasto leque de escolas, onde se inclui a Escola Secundária da Sé, que assentam essencialmente sobre um substrato granítico e no interior das quais as concentrações de radão podem atingir níveis suficientemente elevados.

O Decreto-Lei 79/2006 regulamenta as concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios. Este decreto fixa o limite a observar para a concentração do radão em  $400 \text{ Bqm}^3$ , sendo a sua pesquisa obrigatória em edifícios construídos em zonas graníticas, nomeadamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco. A legislação refere ainda que nos casos particularmente graves (nos casos em que o limite anteriormente indicado é acrescido de 50%), as sanções aplicáveis incluem a suspensão de licença de utilização ou do exercício de actividades e funções, e estabelece em dois anos a periodicidade das auditorias de qualidade do ar interior. O método utilizado irá permitir, entre outras aplicações, avaliar de forma simples e eficaz a qualidade do ar interior das escolas.

Para o cálculo da concentração de radão utilizou-se o programa LEOWorks cujo propósito foi, como já se referiu, a obtenção de um método simples e inovador de contagem da densidade de traços. A função de correlação entre os valores da densidade digital de traços e a densidade de traços dos detectores ITN apresenta um ajuste linear forte entre as variáveis, com um coeficiente de correlação,  $R$ , de 0,9964, o que nos permite concluir que o objectivo desta primeira etapa (calibração relativa dos detectores) foi plenamente conseguida, o que permitiu o cálculo dos valores de concentração de radão com um erro relativo inferior a 20%.

A distribuição de concentração de radão na Escola é heterogénea e permitiu-nos a realização de um mapa de densidades no seu interior. O número de espaços estudados na escola (cerca de uma centena) é um factor importante na análise dos resultados estatísticos.

O 1º e 2º piso do Bloco de Aulas, o R/C e o refeitório do Bloco Administrativo e o Pavilhão Gimnodesportivo apresentam uma concentração média de radão superior a  $400\text{Bq/m}^3$ . Considerando toda a área escolar o valor médio da concentração de radão é de  $479\text{Bq/m}^3$ . Em geral as concentrações obtidas estão dentro do limite estipulado pela legislação no entanto, verifica-se que existem zonas pontuais onde estes valores foram ultrapassados.

Os resultados obtidos não constituíram, em si, uma surpresa, tendo em conta a geologia local, o tipo de construção e as condições climatéricas da cidade da Guarda. Sugere-se, como medida de prevenção, o arejamento das divisões mais fechadas como por exemplo o Conselho Executivo, o Conselho Administrativo, a Secretária, a Sala de Estudo, o Refeitório e algumas salas de aula.

Tratou-se de um estudo muito interessante que pretendo continuar a desenvolver, uma vez que apresenta elevadas potencialidades e perspectivas futuras. Numa primeira fase a ideia é aperfeiçoar o modelo de calibração desenvolvido e numa segunda fase utiliza-lo na obtenção de um mapa de densidades de concentração de radão das escolas da região centro, de um modo eficaz e com menores custos, no intuito de melhorar a qualidade do ar no seu interior.

## Bibliografia

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2006 Report, Vol II, Anexo E, (2006).
- [2] Green, B.M.R.. *Fontes naturais de radiação ionizante na Europa*. Comissão das Comunidades Europeias, (1993).
- [3] Martins, A.. *Física*. Edições Asa, (2005).
- [4] Reis, M. Capucho. *Gazeta da Física*, 30(7), (2008).
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, *Sources and effects of ionizing radiation*, UN, New York, 922 pp, (1993).
- [6] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, *Sources and effects of ionizing radiation*, Vol. I, Annex B: Exposures from natural radiation sources, UN, New York, 84-156, (2000).
- [7] Turner, J. E.. *Atoms, Radiation Protection*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 3<sup>rd</sup> edition, pp 1-4, 18,83-85, 96, 362, 374 - 376, (2007).
- [8] Williams, Christine E., Edwards, Carol. *Measurements and Detection of Radiation*. Taylor & Francis Ltd. 2<sup>nd</sup> edition, (1995).
- [9] Ccallata P.. *Dosimetria gama e concentração de <sup>222</sup>Rn em ambientes de trabalho fechados da cidade de São Paulo*. Tese de Mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, (2005).
- [10] Dwait, N.. *CR-39 detector compared with Kodalpha film type (LR115) in terms of radon concentration*. Elsevier, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 574, pp. 289-291, (2007).
- [11] Eappen, K P, Mayya, Y S. *Calibration factors for LR-115 (type-II) based radon thoron discriminating dosimeter*, Radiation Measurements, Vol. 38, pp. 5-17, (2004).
- [12] Directiva 90/143/Euratom: Recomendação da Comissão, de 21 de Fevereiro de 1990, relativa à protecção da população contra a exposição interior ao radão [Consultado em 10 de Março de 2011]. Disponível em:

URL: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31990H0143:PT:HTML>

[13] Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil. [Consultado em 18 de Setembro de 2011]. Disponível em:

URL: [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s06.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s06.html)

[14] Panfleto do ITN. [Consultado em 18 de Setembro de 2011]. Disponível em:

URL: [www.itn.pt/docum/relat/radao/itn\\_gas\\_radao.pps](http://www.itn.pt/docum/relat/radao/itn_gas_radao.pps)

[15] Figura 13. [Consultado em 18 de Outubro de 2011]. Disponível em:

URL: [http://www.homeprocanada.ca/radon/HP\\_radon.htm](http://www.homeprocanada.ca/radon/HP_radon.htm)

[16] DOSIRAD Company. [Consultado em 18 de Setembro de 2011]. Disponível em:

URL: [http://dosirad.pagespro-orange.fr/soc\\_a.htm](http://dosirad.pagespro-orange.fr/soc_a.htm)

[17] Carta de Radiação Natural. Instituto Geológico e Mineiro (2007).

## Anexo I

Na tabela 21 estão indicados os valores de radiação gama obtidos com o detector Geiger FH40F (FH), o detector de Cintilação 5I5 X12/1.12 (C), o detector PM1703M (PM) e o levantamento efectuado da ventilação, materiais de construção e revestimento usados nas paredes e no chão da divisão.

Para a medição considerou-se a seguinte legenda: 1-ventilação normal; 2 - ventilação escassa; 3 - Sem ventilação.

Para o detector PM é indicada a percentagem de erro associada à medição.

Tabela 21: Valores de radiação gama obtidos com o detector Geiger FH40F (FH), o detector de Cintilação 515 X12/1.12 (C), o detector PM1703M (PM) e o levantamento efectuado da ventilação, materiais de construção e revestimento usados nas paredes e no chão da divisão.

Localização	Nº do Detector	Ventilação	Material de construção		Revestimento		Valor medido de radiação gama			
			Paredes	Chão	Paredes	Chão	FH (µSv/h)	C (cpm)	PM (µSv/h)	PM (%erro)
Biblioteca - 1P	1	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2445	11380	0,18	4
SASE -1P	2	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira				
Secretaria -RC	3	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3045	16970	0,28	3
CS-adm.-RC	4	3	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,269	13510	0,21	4
C. Execut- RC	5	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3455	17910	0,27	4
Arquivo -1P	6	1	Granito	betão	ND	ND	0,26	12570	0,2	4
Arquivo -1P	7	2	Granito	betão	ND	ND	0,2136	13730	0,23	3
Atrio-RC	8	1	Granit/Tij.	betão	Granit/Tij	Tijoleira	0,3182	18980	0,29	3
43-of-R/C	9	3	Granit/Tij.	betão	Tinta	Carpete				
41-of-R/C	10	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2673	18420	0,29	5
O Elect-of-R/C	11	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2845	15650	0,25	5
S Elect-of-R/C	12	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3555	17830	0,28	4
L Elect-of-R/C	13	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3355	17360	0,28	3
OTX-of-R/C	14	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2818	18080	0,29	4
Arrum-of-R/C	15	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3336	17830	0,28	4
OTX-of-R/C	16	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2891	17580	0,29	3
LEM-of-R/C	17	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3282	17460	0,29	4
Corr-of-R/C	18	1	Tijolo	betão	Tinta	Tijoleira	0,2955	16960	0,26	3
LMC-of-R/C	19	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3491	16640	0,28	5
O Mec-of-R/C	20	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2564	14680	0,26	4
SMC-of-R/C	21	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2809	16860	0,27	3
O Mec-of-R/C	22	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2564	14680	0,26	4
TOM-of-R/C	23	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,25	17000	0,27	2
A- corred -3P	24	1	Tijolo	betão	Tinta	Tijoleira	0,239	14550	0,23	5

Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Localização	Nº do Detector	Ventilação	Paredes	Chão	Paredes	Chão	FH (µSv/h)	C (cpm)	PM (µSv/h)	PM (%erro)
A- S8 -3P	25	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,301	14180	0,23	5
A- S10 -3P	26	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,253	14400	0,25	3
A- S13 -3P	27	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,266	14880	0,24	5
A- S15 -3P	28	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,293	15100	0,24	3
A- S17 -3P	29	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,37	14880	0,24	2
A- S19 -3P	30	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,289	15030	0,24	2
A- S20 -3P	31	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,281	15600	0,25	2
A- S10B -3P	32	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,261	14170	0,24	5
A- S18 -3P	33	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,303	15410	0,24	2
A- S16 -3P	34	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3401	15080	0,24	2
A- S14 -3P	35	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,273	15070	0,24	3
A- S12 -3P	36	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,27	15390	0,25	2
A- S11 -3P	37	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,239	15220	0,25	3
A- S9 -3P	38	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,34	15260	0,25	4
A- S7 -3P	39	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,309	15290	0,24	4
A- corred -4P	40	1	Tijolo	betão	Tijoleira	Mosaico	0,198	14000	0,24	4
A- S22 -4P	41	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,298	14160	0,23	1
A- S24 -4P	42	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,327	14890	0,25	2
A- S24A -4P	43	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,356	15540	0,25	2
A- S27 -4P	44	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,28	15200	0,25	2
A- S29 -4P	45	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,263	14950	0,23	1
A- S31 -4P	46	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,322	14200	0,23	5
A- Miner -4P	47	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,36	14160	0,23	1
A- I33 -4P	48	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,226	14620	0,23	1
A- S32 -4P	49	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,269	14520	0,24	3
A- S30 -4P	50	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,301	14980	0,23	1
A- S28 -4P	51	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,313	14960	0,24	4

Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Localização	Nº do Detector	Ventilação	Paredes	Chão	Paredes	Chão	FH (µSv/h)	C (cpm)	PM (µSv/h)	PM (%erro)
A- S26 -4P	52	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,28	15720	0,25	3
A- S25 -4P	53	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,352	15190	0,23	2
A- S23 -4P	54	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,245	15530	0,23	2
A- S34 -5P	55	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,289	13570	0,24	2
A- S21 -4P	56	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,288	15270	0,23	2
A- S35 -5P	57	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,295	15150	0,24	3
A- S36 -5P	58	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,273	14720	0,25	5
A- S37 -5P	59	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,269	15150	0,24	3
A- S38 -5P	60	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,344	14750	0,24	3
A- S39 -5P	61	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,333	14380	0,23	4
A- S40 -5P	62	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,258	14600	0,23	3
CS-adm.-RC	63	3	Tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2553	17290	0,28	4
Papelaria-RC	64	3	Tijolo	betão	Tinta	madeira	0,321	15500	0,23	4
Bar- RC	65	1	Tijolo	betão	Tinta	Azulejo	0,3809	16330	0,26	3
Cozinha-RC	66	1	Tijolo	betão	Azulejo	Azulejo	0,2382	16670	0,27	3
Refeit- RC	67	1	Tijolo	betão	Tinta	Azulejo	0,2382	16670	0,28	3
Aulas(OM) -1P	68	3	Tij/Granit	granito	ND	Cimento	0,2255	17050	0,27	3
A.(LQ) -1P	69	1	tijolo	granito	Tinta	Tijoleira	0,2582	15180	0,24	5
A. -1P	70	3	tijolo	granito	Tinta	Tijoleira	0,2273	13740	0,25	3
A.(LF) -1P	71	1	tijolo	granito	Tinta	Tijoleira	0,2882	16790	0,26	4
A.(LB) -1P	72	1	tijolo	granito	Tinta	Tijoleira	0,2755	14830	0,25	4
A.(LG) -1P	73	1	tijolo	granito	Tinta	Tijoleira	0,3555	15780	0,25	3
A(LGeral) -1P	74	2	tijolo	granito	Tinta	Tijoleira	0,2627	15950	0,26	2
A. (Ar.) -1P	75	3	tijolo	betão	Tinta	ND	0,263	14070	0,24	4
Biblioteca -RC	76-P	1	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2445	11380	0,18	4
Repro-2P-BA	77-P	2	Tijolo	betão	Tinta	Alcatifa				
WC_4ºP	78-P	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,293	15630	0,25	5
WC_3ºP	79-P	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,285	15660	0,24	5

Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Localização	Nº do Detector	Ventilação	Paredes	Chão	Paredes	Chão	FH (µSv/h)	C (cpm)	PM (µSv/h)	PM (%erro)
A-Escadas-RC	80	2	Granito	Granito	ND	ND	0,2673	18480	0,33	3
A-Escadas2-RC	81	2	Granito	Granito	ND	ND	0,4936	28410	0,47	3
A- Arrec.-1P	82	3	tijolo	betão	Tinta	ND	0,3695	14920	0,25	4
S1- 2P-BA	83	2	tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3037	15370	0,25	3
S2- 2P-BA	84	2	tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,2609	16630	0,24	4
Ar- 2P-BA	85	3	tijolo	betão	Tinta	Tijoleira	0,2473	16000	0,26	4
SP2- 2P-BA	86	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2409	15700	0,26	2
SP- 2P-BA	87	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2427	16380	0,26	5
S3- 2P-BA	88	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2936	15420	0,26	3
atrio- 2P-BA	89	1	tijolo	betão	Tinta	tijoleira	0,28	15760	0,26	4
S4- 2P-BA	90	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2691	15610	0,25	3
S5- 2P-BA	91	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2755	15880	0,25	2
S6- 2P-BA	92	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,2673	15120	0,25	2
Artes- 2P-BA	93	2	tijolo	betão	Tinta	madeira	0,3091	15490	0,25	4
Sala Estut-RC	94	3	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,4018	18140	0,31	3
Pavilhão	95	2	Tijolo	betão	Tinta	Cimento	0,3673	17400	0,26	3
Pavilhão	96	2	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,3073	16090	0,26	4
Exterior-Pavilhao	97						0,25	14920	0,26	3
WC_3ºP	98	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,285	15660	0,24	5
A- Arrerc -5P	100	2	Tijolo	betão	ND	cimento	0,303	15290	0,26	5
Corredor-Rc	101-Fita	1	Gran/Tij	Cimento	Tinta	Tijoleira	0,2745	27170	0,32	3
Biblioteca -RC	B1-P	1	Tijolo	cimento	Tinta	Madeira	0,2445	11380	0,18	4
Repro-2P-BA	B2-P	2	Tijolo	betão	Tinta	Alcatifa				
WC_4ºP	B3-P	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,293	15630	0,25	5
WC_3ºP	B4-P	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,285	15660	0,24	5
Biblioteca -RC	F1-P	1	Tijolo	cimento	Tinta	Madeira	0,2445	11380	0,18	4
Reprografia	F2-P	2	Tijolo	betão	Tinta	Alcatifa				
WC_4ºP	F3-P	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,293	15630	0,25	5

Determinação da Concentração de Radão num Estabelecimento de Ensino Público

Localização	Nº do Detector	Ventilação	Paredes	Chão	Paredes	Chão	FH ( $\mu\text{Sv/h}$ )	C (cpm)	PM ( $\mu\text{Sv/h}$ )	PM (%erro)
<b>WC_3ºP</b>	F4-P	3	Tijolo	betão	Tinta	Mosaico	0,285	15660	0,24	5
<b>Sala Estut-RC</b>	F5	3	Tijolo	betão	Tinta	Madeira	0,4018	18140	0,31	3